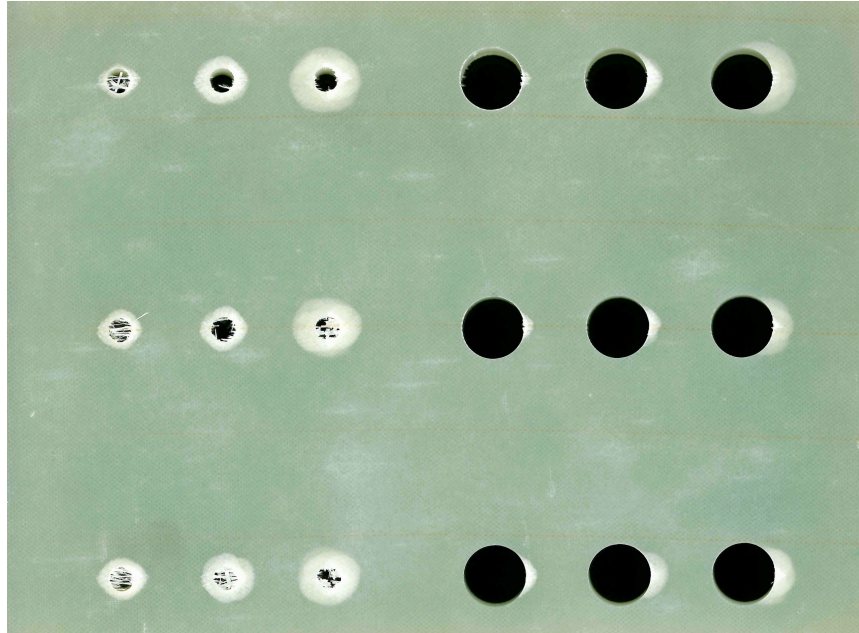




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



Juntas Mecânicas em Material Compósito

PEDRO A. LUZ VALENTE
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof. Doutor Joaquim Barbosa
Mestre Afonso Leite

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Quaresma Dias

Vogais:

Prof. Doutor Joaquim Barbosa
Doutora Virgínia Infante
Doutora Filipa Moleiro
Mestre Afonso Leite

Setembro de 2012

“Always desire to learn something useful.”

Sophocles

(Deseje sempre aprender alguma coisa útil)

I. Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível com a ajuda de diversas pessoas e por isso não podia deixar de agradecer:

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Joaquim Barbosa e ao Mestre Afonso Leite, por toda a ajuda prestada, pela orientação nos objectivos a atingir e pela disponibilidade demonstrada.

Ao Mestre Tiago Silva e ao Eng.º Sérgio Palma, por toda a ajuda prestada na realização dos ensaios em laboratório no ISEL.

Ao Sr. Manuel Cordeiro e à empresa J.S. Gouveia Lda., pela disponibilização da fresa usada na realização dos ensaios de furação.

Aos meus amigos que sempre me incentivaram, e ajudaram no decorrer deste caminho académico.

Um agradecimento à minha família, aos meus filhos pelo tempo em que podia ter estado com eles, e em especial à minha mulher Susana que sempre me incentivou a continuar e sempre ficou a meu lado nos piores momentos.

II. Resumo

O âmbito da presente tese é o estudo de juntas mecânicas em material compósito realizado com fibra de vidro.

Os materiais compósitos são a solução procurada pela generalidade dos sectores da indústria, devido essencialmente à sua grande capacidade estrutural e à sua resistência mecânica específica, ou seja, a resistência mecânica versus peso ser em geral maior que nas ligações metálicas.

O estudo efectuado neste trabalho é referente à delaminação presente na furação de materiais compósitos, sendo esta um dos problemas de maior gravidade, existente quando se realiza a furação do material. Este problema influencia a integridade estrutural do material bem como a sua fiabilidade a longo prazo.

Foram usados dois métodos de furação, o primeiro conhecido por furação convencional e o segundo habitualmente designado método KTH ou por furação orbital. Foi feita uma comparação entre estes dois métodos e verificado qual deles apresenta menor delaminação em torno do furo e melhor qualidade de furo.

Conclui-se que a furação orbital apresenta uma delaminação inferior relativamente à furação convencional, e que esta é preferível para a realização de furação em material compósito.

Palavras-chave:

Compósitos, fibra de vidro, delaminação, furação convencional e furação orbital.

III. Abstract

The scope of this thesis is the study of mechanical joints in composite materials made of fiber glass.

Composite materials are the solution sought by several industry fields, mainly due to its large structural capacity and mechanical resistance, i.e., the mechanical resistance vs. weight in most of the cases is more than the equivalent in a metal component.

The study carried out in this work is related with delamination present in drilling of composite materials, which is an existing problem when performing the drilling of composites. This problem influences the structural integrity of the material and its long-term reliability.

In the study two methods are carried out for drilling; the first method applied is known as conventional drilling and the second method is known as KTH method or orbital drilling. A comparison is made between these two methods and checked which one has the least delamination around the hole and better quality. Assay was performed in the laboratory.

As conclusion, is observed that the orbital drilling presents a relatively lower delamination compared to conventional drilling and because of that, that method is preferable for drilling of composite materials when we want less defect-free holes.

Key Words:

Composite, glass fiber, delamination, conventional drilling and orbital drilling.

ÍNDICE

I. Agradecimentos	II
II. Resumo	III
III. Abstract.....	IV
IV. Lista de abreviaturas ou Nomenclatura.....	VII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.1. Delaminação na Furação Convencional	7
2.1.2. Delaminação na Furação Orbital	9
2.1.3. Sistema de Aquisição de Imagens	11
3. CONSTITUIÇÃO DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS.....	12
3.1. Polímeros Reforçados com Fibras	14
3.1.1. Compósito laminado.....	17
3.1.2. Compósito em Sanduiche	18
3.2. Cargas Aplicadas	18
3.3. Resinas	20
3.3.1. Tipos de Resinas.....	23
3.4. Fibras	25
3.4.1. Tipos de Fibras	27
4. FURAÇÃO DE COMPÓSITOS	29
4.1. Ferramentas de Corte	29
4.2. Furação	30
4.3. Força Axial	31
4.4. Dano na Furação	32
4.5. Redução de Dano na Furação de Compósitos	33

5. JUNTAS EM MATERIAL COMPÓSITO	35
5.1. Juntas Adesivas.....	36
5.1.1. Modo de Falha nas Juntas Adesivas.....	37
5.1.2. Vantagens das Juntas Adesivas	38
5.1.3. Desvantagens das Juntas Adesivas.....	39
5.1.4. Regras para Aplicação de Juntas Adesivas	39
5.2. Juntas Mecânicas	40
5.2.1. Vantagens das Juntas Mecânicas.....	42
5.2.2. Desvantagens das Juntas Mecânicas	42
5.2.3. Modos de Falha nas Juntas Mecânicas.....	42
5.2.4. Parâmetros para Aplicação de Juntas Mecânicas	43
6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
6.1. Material e Equipamentos	44
6.2. Metodologia	46
7. RESULTADOS E ANÁLISE.....	50
7.1. Furação Convencional	50
7.2. Furação Orbital	55
7.3. Furação convencional vs. Furação orbital	59
8. CONCLUSÕES.....	63
9. TRABALHOS FUTUROS.....	65
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

IV. Lista de abreviaturas ou Nomenclatura

FC	Furação Convencional
FO	Furação Orbital
PRF	Polímero Reforçado com Fibra
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro)
V_c	Velocidade de Corte
a	Avanço
F_d	Factor de Delaminação
F_{da}	Factor de Delaminação Ajustado
CNC	Comando Numérico Computadorizado
HSS	High Speed Steel (Brocas de Aço Rápido)

Índice de Figuras

Figura 2-1 – Esquema de área delaminada.....	5
Figura 2-2 – Delaminação à entrada (a) e à saída do furo (b) (DeFu Liu et al. 2012).....	8
Figura 2-3 – Movimento da ferramenta na furação orbital (Sadek A. 2002).....	10
Figura 2-4 – Deflexão na fibra, furação convencional (a) e furação orbital (b).....	10
Figura 3-1 – Constituição de um compósito.....	12
Figura 3-2 – Tecido (a) (Sanjay 2002) e Unidireccional (b).....	13
Figura 3-3 – Gráfico da junção da resina com a fibra (SP Systems).....	15
Figura 3-4 – Representação de esquema de empilhamento a) Unidireccional e b) Multidireccional.....	17
Figura 3-5 – Compósito em Sanduiche.	18
Figura 3-6 – Exemplo de aplicação de carga à tracção (SP Systems).....	19
Figura 3-7 – Exemplo de aplicação de carga à compressão (SP Systems)	19
Figura 3-8 – Exemplo de aplicação de carga ao corte (SP Systems).	20
Figura 3-9 – Exemplo de aplicação de carga à flexão (SP Systems).	20
Figura 3-10 – Fases de extensão de um compósito	21
Figura 3-11 – Gráfico da deformação até à rotura (SP Systems).....	22
Figura 4-1 – Tipos de ferramentas (Sandvik Coromant Co.).....	30
Figura 5-1 – Tipos de junta adesiva (Sanjay, 2002).....	36
Figura 5-2 – Junta com aplicação de carga (Sanjay, 2002).....	37
Figura 5-3 – Tipos de falha adesiva (Sanjay, 2002).....	38
Figura 5-4 – Tipos de junta mecânica (Sanjay, 2002).....	41
Figura 5-5 – Tipos de juntas mecânicas, (a) junta simples, (b) junta dupla e (c) junta de topo (Sanjay, 2002).....	41
Figura 6-1 – Placa de laminado de matriz polimérica utilizada nos ensaios.....	44
Figura 6-2 – Fresa da Seco Tools.	45

Figura 6-3 – Vista das navalhas.....	45
Figura 6-4 – Centro de maquinagem CNC Cincinatti.....	45
Figura 6-5 – Aperto da placa na CNC.....	46
Figura 6-6 – Furação da placa de compósito.....	47
Figura 6-7 – Exemplo de fases de tratamento	48
Figura 7-1 – Delaminação na superfície de entrada da FC obtida por tratamento de imagem.	51
Figura 7-2 – Delaminação na superfície de saída da FC obtida por tratamento de imagem... 51	51
Figura 7-3 – Gráfico F_{da} , entrada do furo (a) com V_c de 265 RPM, 637 RPM e de 1061 RPM, saída do furo (b) com V_c de 265 RPM, de 637 RPM e de 1061 RPM.	53
Figura 7-4 – Delaminação na superfície de entrada da FO obtida por tratamento de imagem.	55
Figura 7-5 – Delaminação na superfície de saída da FO obtida por tratamento de imagem... 56	56
Figura 7-6 – Gráfico F_{da} , entrada do furo (c) com V_c de 265 RPM, 637 RPM e de 1061 RPM, saída do furo (d) com V_c de 265 RPM, de 637 RPM e de 1061 RPM.	58
Figura 7-7 – Gráficos F_{da} , entrada do furo (e) com V_c de 265 RPM, (f) com V_c de 637 RPM, (g) com V_c de 1061 RPM, saída do furo (h) com V_c de 265 RPM, (i) com V_c de 637 RPM, (j) com V_c de 1061 RPM.	61

Índice de Tabelas

Tabela 3-1 – Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de resina (SP Systems).....	24
Tabela 3-2 – Propriedades básicas das fibras (SP Systems).....	26
Tabela 6-1 – Valores usados nos ensaios de FC e de FO.....	49
Tabela 7-1 – Valores obtidos para furação convencional.....	52
Tabela 7-2 – Valores obtidos para furação orbital.....	56
Tabela 7-3 – Valores F_{da} na entrada para furação convencional (FC) vs. furação orbital (FO).	59
Tabela 7-4 – Valores F_{da} na saída para furação convencional (FC) vs. furação orbital (FO)..	60

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais compósitos tem sofrido um grande incremento ao longo dos tempos, com a implementação deste tipo de material na generalidade dos sectores industriais, em todos os campos, como exemplo na aeronáutica, na indústria automóvel, construção de navios, plataformas offshore, nos artigos desportivos, na medicina, e em produtos que se pretenda fiáveis, com boa resistência mecânica estrutural e com pesos mais leves comparativamente com o uso de ligas metálicas.

O presente trabalho pretende fazer o estudo de ligações mecânicas de componentes de materiais compósitos, quer seja com outro material compósito ou com uma liga metálica. O tipo de ligação mais usada é a aparafusada ou rebitada, sendo necessário efectuar a furação do material compósito em questão, de modo a se poder fazer a posterior ligação com o outro material. A furação é usualmente o último passo a realizar na realização de juntas mecânicas com qualquer material compósito, logo é necessário que a mesma ocorra com a maior perfeição possível, de modo a minimizar o número de peças não conformes. Dado que estes materiais, devido à sua composição, são diferentes dos metais, existe a necessidade de se efectuar testes que comprovem quais os parâmetros a controlar e que estejam inerentes ao bom acabamento da furação do compósito. Devido a isto existe uma oferta extraordinariamente elevada no que diz respeito a ferramentas de corte (brocas e fresas), dado que cada uma destas está indicada para um tipo de estrutura do compósito a usar.

A nível pessoal, a motivação para este tema e tipo de trabalho, vem da curiosidade acerca deste tipo de materiais e das possibilidades que oferecem no fabrico de estruturas e componentes. Eles permitem realizar, uma enorme quantidade de peças para determinada aplicação e viu-se neste trabalho a oportunidade de se poder conhecer em maior profundidade o modo como se fabrica o compósito, o tipo de técnicas, o tipo de cura, os equipamentos necessários para os diferentes tipos de compósito e de cura. O resultado final do compósito visto que é um material que

permite as mais variadas geometrias e tipos de acabamentos, dependendo da técnica usada e do tipo de manufactura. Assim foi adquirida uma maior compreensão dos materiais compósitos e o que esperar deles, podendo construir agora já com algum conhecimento, pequenas peças que já a algum tempo pretendia construir.

Os objectivos que se pretendem a atingir, são:

- O seu comportamento, após uma operação de furação convencional e uma orbital, verificar o resultado dessas operações e analisar o dano que se criou (delaminação existente);
- Comparação com a literatura existente e validação de resultados.

O resultado final a obter ficou cumprido, mas com uma contrariedade. Foi possível conhecer melhor os materiais compósitos e suas características e aplicações, mas devido à falta de meios, não foi possível realizar mais do que um conjunto de ensaios. O que só por si para validação de resultados de outros autores, se ficou só com os resultados obtidos de um ensaio. Não foi possível realizar um segundo conjunto de ensaios para comparação entre ensaios realizados e verificar se os resultados eram aproximados. Apesar das contrariedades ao longo do trabalho a nível de disponibilidade de equipamento oficial, pensa-se ter atingido os objectivos propostos com o trabalho.

No trabalho foi usada uma fresa com revestimento a diamante da Seco Tools, gentilmente emprestada pela empresa J.S. Gouveia Lda, para os ensaios a realizar numa placa de compósito de fibra de vidro pré-impregnada. Foram realizados dois tipos de furação de modo a se poder concluir qual poderá proporcionar uma maior qualidade do furo realizado. As furações realizadas são descritas como furação convencional (FC), em que é feito o furo simples com a broca no eixo axial, e a furação orbital (FO), em que é feito o furo radialmente. Dos furos realizados foram obtidos os valores da delaminação existente e feita a comparação entre os dois tipos de furação, concluindo que a furação orbital consegue fornecer valores de delaminação mais aceitáveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais diferentes entre si, sendo usados desde os tempos mais remotos da humanidade. Vejamos o exemplo dos egípcios que juntavam palha ao barro para fazerem tijolos para a construção das casas, obtendo assim um maior desempenho estrutural por parte dos tijolos. O primeiro compósito de fibras sintéticas que veio revolucionar a indústria dos compósitos, apareceu no ano 1932, quando foi criada por DuPont o primeiro polímero de poliamida termoplástico (Nylon 6-6). Depois no ano de 1936, é registada a primeira patente relativa a fibra de vidro, e desde este tempo que os materiais compósitos têm estado a ser desenvolvidos com diferentes materiais, de modo a se estudar os seus comportamentos e adaptá-los aos diferentes sectores de indústria existentes. Existindo actualmente um grande número de diferentes tipos de compósitos que se podem usar dependendo do tipo de produto ou estrutura a que se pretende aplicar.

Apesar de se usar as mesmas operações e equipamentos utilizados na maquinação de materiais metálicos, a maquinação de polímeros reforçados com fibras (PRF) difere muito dos materiais metálicos, dado que os materiais compósitos têm uma estrutura diversificada e heterogénea e são formados por fibras dispersas, alinhadas ou não. A maquinação destes materiais tem ainda a peculiaridade de ser um processo normalmente experimental e que envolve um grande número de variáveis. A maquinação dos materiais compósitos é muito complexa devido à sua heterogeneidade, dependendo muito das propriedades da resina e das fibras, da sequência de empilhamento, da quantidade de fibras e sua orientação, da sensibilidade ao calor e abrasividade das fibras (Durão et al. 2006). Devido a esta característica a operação de furação causa diversos defeitos nas peças, tal como a delaminação, as fissuras intralaminares, descolamentos entre a fibra e a matriz e danos térmicos. São defeitos que provocam a deterioração das propriedades mecânicas do compósito e podem afectar a sua fiabilidade, devido a isto quando são aplicados em componentes críticos para a segurança de estruturas, são aplicados com

a devida cautela. As ferramentas de furação também devem de ser avaliadas do seu bom estado de conservação (desgaste da ferramenta), dado que esta também influencia o estado final da furação.

A pesquisa neste trabalho é realizada com um material compósito de fibra de vidro, construído através de um pré-impregnado de fibra de vidro, onde será estudada a operação de furação por dois métodos diferentes e investigar a influência dos parâmetros de furação (velocidade de corte e avanço). Com os parâmetros a investigar será feita a comparação entre os dois processos de furação de modo a determinar qual poderá ser mais vantajoso para a maquinação de um material compósito, com base nos danos provocados (delaminação nos furos à entrada e à saída).

A furação dos materiais compósitos tem sido objecto de estudo de diversos investigadores, ver resumo em DeFu Liu et al. (2012), que concluíram que o parâmetro que mais influência a delaminação é o avanço da ferramenta, tal como tinham concluído Tsao e Hocheng (2004).

Após a furação de um compósito podemos observar que fica uma extensão de zona delaminada à volta do furo. Este é o aspecto considerado como o mais crítico para a caracterização do dano. Esta extensão dá lugar a um parâmetro de avaliação do dano. O parâmetro proposto por Mehta et al. (1992), conhecido por Rácio de Dano, define-se como:

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}} \quad (1)$$

em que D_{MAR} é a área delaminada do furo e D_{AVG} é a área nominal do furo.

A extensão da zona afectada pode ser ainda definida como sugerido por Chen (1997), designado como factor de delaminação F_d , definido através da expressão,

$$F_d = \frac{D_{máx}}{D} \quad (2)$$

Em que $D_{m\acute{a}x}$ é o máximo diâmetro delaminado e D é o diâmetro nominal do furo. Na figura 2.1, indicam-se as áreas referidas.

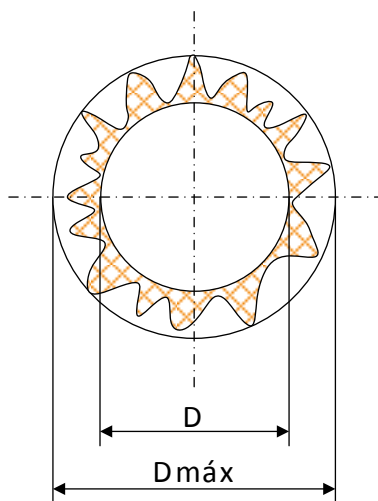


Figura 2-1 – Esquema de área delaminada.

Este factor é usado normalmente quando temos uma área delaminada uniforme à volta do furo, porque para casos em que a área não é uniforme este parâmetro fornece-nos um F_d maior do que o que é na realidade. Por esse facto foi proposto um novo factor por Davim et al. (2007), chamado de Factor de Delaminação Ajustado (F_{da}). Este novo critério conta com o facto de existir uma forma irregular da delaminação à volta do furo, e é definido como a soma de dois parâmetros,

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{m\acute{a}x}}{D} + \beta \frac{A_{m\acute{a}x}}{A} \quad (3)$$

Em que o primeiro parâmetro é-nos fornecido pela Equação (2) multiplicado pela constante α , $A_{m\acute{a}x}$ é a área relacionada com o máximo diâmetro da zona de delaminação ($D_{m\acute{a}x}$) e A é a área nominal do furo (D). As constantes α e β são pesos em que a sua soma é igual a 1.

$$A_{m\acute{a}x} = \pi \cdot \frac{D_{m\acute{a}x}^2}{4} \quad (4)$$

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

Substituindo as equações (2), (4) e (5) na equação (3), obtemos:

$$F_{da} = \alpha \cdot F_d + \beta \cdot F_d^2 \quad (6)$$

Considerando β como o rácio de dano na área de dano (A_d) para a área correspondente a $D_{máx}$ ($A_{máx}$) menos a área nominal do furo (A). O parâmetro α é o complemento de β , ou seja, $\alpha = 1 - \beta$. Deste modo podemos reescrever a equação (6) como sendo:

$$F_{da} = (1 - \beta) \cdot F_d + \beta \cdot F_d^2 \quad (7)$$

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{máx} - A)} \cdot (F_d^2 - F_d) \quad (8)$$

Da equação (8) podemos concluir que:

Se

$$A_d \rightarrow (A_{máx} - A) \Rightarrow F_{da} \rightarrow F_d^2$$

ou então temos,

$$A_d \rightarrow 0 \Rightarrow F_{da} \rightarrow F_d$$

ou seja, se a tendência for uma área delaminada igual ao máximo diâmetro ($D_{máx}$) da zona de delaminação, o factor de delaminação ajustada (F_{da}) apresenta um valor igual ao quadrado do factor de delaminação convencional (F_d). Ou então se a área de delaminação for mínima, o factor de delaminação ajustada (F_{da}) apresenta um valor a tender para o factor de delaminação convencional (F_d).

Como neste trabalho se propõe fazer a comparação entre o método de furação convencional (FC) e o método de furação orbital (FO), usa-se o F_{da} para comparação dos dois métodos, porque a FO, tem uma delaminação irregular em torno do furo.

2.1.1. Delaminação na Furação Convencional

No estudo feito por DeFu Liu et al. (2012), foram referenciados autores que realizaram diversos estudos sobre os materiais compósitos, tendo obtido conclusões muito similares entre eles e que vão de encontro ao objecto de estudo realizado neste trabalho.

Conforme os autores verificaram nos diversos trabalhos de investigação, foram usadas brocas tipo helicoidais e outras com pontas especiais, sendo estas a atrair maior atenção para serem usadas na furação e estudadas sistematicamente.

Também é referido que os trabalhos de investigação podem ser divididos em quatro tipos:

1. Experiências de avaliação. Nestas experiências é avaliado a influência dos parâmetros de entrada na furação (velocidade de rotação, avanço, geometria da ponta da broca e materiais usados) e na saída (delaminação e força axial).
2. Experiências sem delaminação. O objectivo primário destas experiências é a minimização da delaminação induzida pela furação do compósito laminado.
3. Efeitos das geometrias das ferramentas e dos materiais na força axial e na qualidade dos furos.
4. Desgaste das ferramentas e o seu efeito na força axial e na qualidade do furo.

A delaminação é uma falha no laminado, induzida neste caso pela furação do compósito, que é um fenómeno indesejável e que foi reconhecido como o maior dano encontrado aquando da furação do compósito.

As experiências efectuadas permitiram concluir que existe o fenómeno de

delaminação, e este ocorre na entrada e na saída da periferia do furo. Estes últimos são chamados de “Peel-up” e de “Push-out” respectivamente.

A delaminação “Peel-up” ocorre na periferia da entrada do furo, como se pode ver na figura 2.2a. Quando as arestas de corte da ferramenta entram em contacto com o compósito, e em consequência do avanço da ferramenta de corte, o material tem tendência a ser puxado para cima ao longo das espiras da fresa em vez de ser cortado. Este efeito faz com que as camadas superiores do material se separem do resto da placa. Normalmente este problema resolve-se com a diminuição do avanço.

O “Push-out” ocorre na periferia da saída do furo, como se pode ver na figura 2.2b. Esta delaminação é consequência da força compressiva que a fresa exerce sobre o compósito. As camadas de laminado que se encontram por baixo da fresa são empurradas e tendem a separar-se das camadas superiores, fracturando as ligações intralaminares à volta do furo. Este problema pode ser reduzido com uma configuração de geometria de ponta de fresa adequada ou com a selecção dos parâmetros de corte adequados para a configuração do compósito.

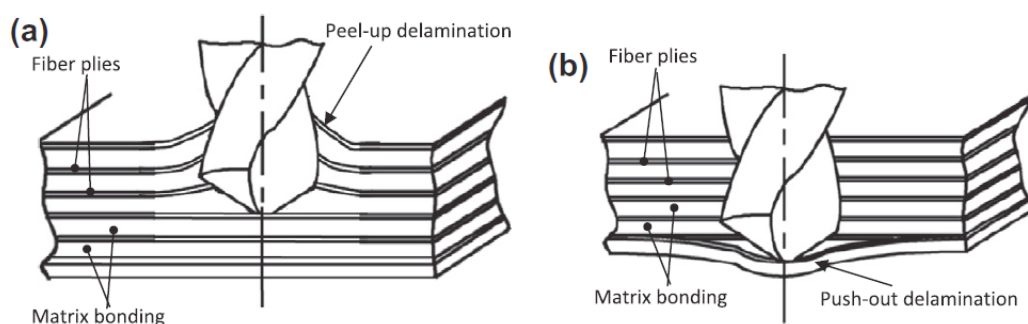


Figura 2-2 – Delaminação à entrada (a) e à saída do furo (b) (DeFu Liu et al. 2012)

Na FC, segundo os autores (Khashaba 2004, J.C. Campos Rubio et al. 2007, Khashaba et al. 2007 e DeFu Liu et al. 2012), dos parâmetros que são inicialmente escolhidos para determinado processo de furação, a velocidade de corte (V_c) e o avanço (a) são os que mais influenciam a delaminação causada no material

compósito, sendo que das duas o avanço é aquela que mais influencia o valor da delaminação. E geralmente os parâmetros ideais a usar é um avanço baixo com uma velocidade elevada, de modo a favorecer a não delaminação e prolongar a vida útil da ferramenta.

Em Durão et al. (2006), indica-se os valores a usar para furação de compósitos de fibra de vidro se devem situar entre os 1,5 m/min e os 40 m/min para a velocidade de corte, e para o avanço se devem situar entre os valores de 0,0057 mm/rot e os 2,63 mm/rot. Na realização deste trabalho foram seleccionados aleatoriamente os valores para a velocidade de corte de 5, 12 e 20 m/min (265, 637 e 1061 RPM respectivamente), e para o avanço os valores de 0.03, 0.10 e 0.25 mm/rot, valores esses que ficam dentro do intervalos de valores usados pelos diversos autores encontrados na literatura especializada.

2.1.2. Delaminação na Furação Orbital

No trabalho desenvolvido por Sadek A. et al. (2012), é feita referência à furação orbital.

Este tipo de furação tem mostrado grande potencial na furação de material compósito, devido à redução das forças de corte e das temperaturas geradas.

Nesta furação temos a ferramenta de corte a girar sobre o seu eixo e simultaneamente sobre o eixo do furo que se pretende, para visualização do percurso realizado ver figura 2.3.

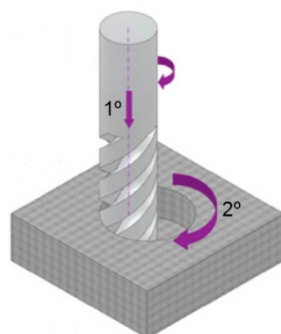


Figura 2-3 – Movimento da ferramenta na furação orbital (Sadek A. 2002)

As análises referidas pelo autor na sua investigação, mostram que no caso da FC, a fibra vai sofrer quase o dobro do valor de deflexão existente na fibra no caso da FO. Isto significa que a mesma força axial na FO efectua menos pressão que na FC. Ver figura 2.4.



Figura 2-4 – Deflexão na fibra, furação convencional (a) e furação orbital (b)
(Sadek A. 2002)

Por se direccionar a maioria do trabalho da ferramenta para a direcção tangencial, a componente da força axial é reduzida significativamente, enquanto a força tangencial aumenta. Esta distribuição de energia aquando da realização do furo vai fazer com que ocorra menos delaminação ou eventualmente a sua eliminação, porque as fibras de compósito estão mais propensas a sofrer delaminação sobre a acção das forças axiais e não tanto com as tangenciais. A adicionar a este facto na FO, temos uma maior acção de arrefecimento na ferramenta e no compósito na zona de furação, devido ao espaço criado entre a ferramenta e o compósito, é aqui criado um fluxo de ar que passa pelo furo e faz com que exista uma maior dissipação de calor.

A conclusão que o autor do estudo chegou era que a FO em relação à FC, era

vantajosa em todos os sentidos, dado os valores de delaminação obtidos serem muito menores que os valores obtidos na FC. A qualidade do furo também era superior relativamente ao outro tipo de furação, sendo no entanto de se efectuar mais estudos para se poder comprovar os resultados obtidos.

2.1.3. Sistema de Aquisição de Imagens

Na medição do tamanho da delaminação, são usados dois métodos para a aquisição de imagens, os métodos são:

- **Radiografia**

A análise por radiografia é um processo empregue em ensaios não destrutivos de materiais. É definido como a diferença de absorção de uma radiação penetrante pelo objecto que está a ser inspeccionado. Essa diferença de absorção pode ser resultante de variações na composição da peça, da sua densidade ou até da sua espessura. A radiação não absorvida é captada numa película fotossensível, o que permite a sua posterior revelação (Durão et al. 2004).

- **Inspecção ultra sónica (C-Scan).**

Na inspecção ultra-sónica uma onda sonora de determinada frequência acima do audível e normalmente entre 1 e 50 MHz é feita passar através do compósito. A onda propaga-se dentro do material a uma dada velocidade e sofre modificações devido às barreiras que vai encontrando, do material ou de defeitos. A delaminação como é orientada perpendicularmente ao eixo do furo e à direcção de propagação da onda, é facilmente detectada por esta técnica (Durão et al. 2004).

3. CONSTITUIÇÃO DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

O grande desafio dos materiais compósitos está em conseguir adaptá-los aos diversos campos de aplicação existentes como componentes estruturais e multifuncionais.

O desenvolvimento de novos materiais compósitos para uma determinada aplicação tecnológica precisa de ser orientada para o objectivo que se quer obter e com as características necessárias estruturalmente.

Os materiais compósitos estruturais são compostos por dois ou mais elementos, com diferentes propriedades, que se juntam, para obter propriedades distintas de cada um dos componentes e que de outro modo não seria possível ou viável. A junção mais comum é a utilização de dois elementos. O primeiro é chamado de matriz (normalmente uma resina polimérica) e envolve o segundo elemento. O segundo elemento chama-se de reforço, são as fibras, que podem ser fibras de vidro, de carbono ou de aramida. A figura 3.1 exemplifica a composição de um compósito estrutural.

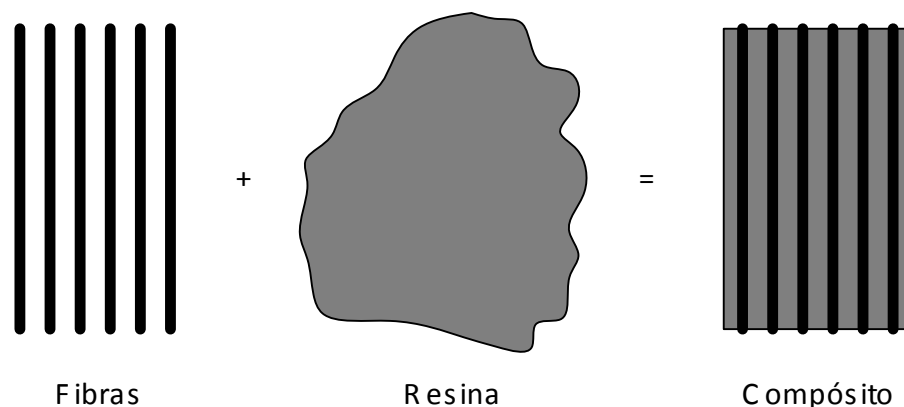


Figura 3-1 – Constituição de um compósito.

Os tipos de compósitos existentes são caracterizados pela orientação das suas fibras, e pelos vários métodos de construção usado para manter as fibras juntas. Deste modo temos como orientações mais comumente usadas, a orientação unidireccional e a orientação em tecido ou "woven", ver figura 3-2 .

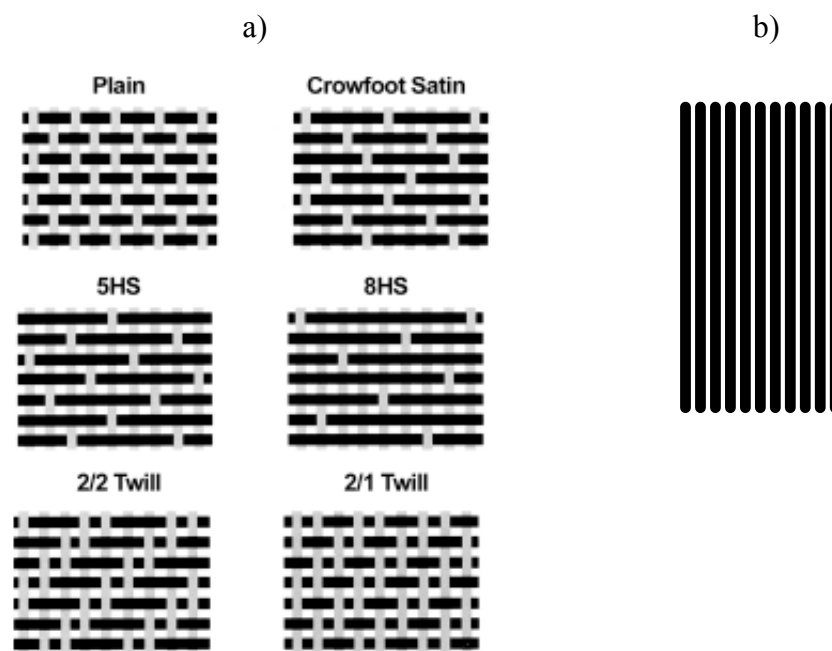


Figura 3-2 – Tecido (a) (Sanjay 2002) e Unidireccional (b).

- **Unidireccional**

No formato unidireccional as fibras são colocadas paralelas entre si, conforme descrito por Sanjay (2002). Esta forma de compósito é usada quando é necessário obter uma determinada resistência estrutural só numa direcção, como o exemplo de uma prancha de ski, em que as fibras são colocadas longitudinalmente para melhorar a resistência à dobragem. Uma pequena percentagem de fibras também podem ser colocadas noutras direcções de modo a segurar as fibras primárias no lugar. Normalmente as fibras são colocadas a 0° (longitudinal) e se necessário pode-se colocar as fibras em qualquer ângulo desde 0° a 90° para conferir maior resistência ao compósito. As verdadeiras fibras unidireccionais, permitem colocar os esforços exactamente no sentido necessário, e na quantidade necessária. Este formato é muito usado na construção de tubos pois permite colocar as fibras em variados ângulos. Deste modo, e segundo o autor Chaves e Sousa (2012), temos as seguintes vantagens para este tipo de arranjo de fibras:

- Uma possibilidade de adaptação maior às cargas;
- Uma maior tensão admissível;

- Os custos de matéria prima são mais baixos;
 - São recomendados para aplicações onde as vantagens justifiquem o aumento dos custos de fabrico e onde os contornos o permitam.
- **Tecido ou "Woven"**

Segundo o autor Sanjay (2002), o formato de tecido normalmente vem em rolo e só tem uma camada. Existem diferentes tipos de tecelagem das fibras como se pode observar na figura 3-2 (a). A quantidade de fibra em diferentes direcções é controlado pelo padrão da tecelagem, e é este padrão que vai conferir as propriedades de resistência estrutural que o compósito vai possuir. Deste modo, e segundo o autor Chaves e Sousa (2012), temos as seguintes vantagens para este tipo de arranjo de fibras:

 - Menores custos dos fabricos;
 - Os danos provocados pelo manuseamento são mais reduzidos;
 - Melhor formabilidade de contornos e cantos;
 - Maior resistência à delaminação.

3.1. Polímeros Reforçados com Fibras

O material compósito permite obter uma grande variedade de características e têm a grande habilidade de se poderem construir com as geometrias mais variadas.

Materiais como o vidro e a aramida têm uma grande capacidade à tracção e à compressão, mas no seu estado “sólido” estas propriedades não se revelam. Quando estes materiais são sujeitos a esforços, pequenas falhas na superfície dos mesmos levam a que o material se fragmente antes de chegar ao ponto teórico da sua capacidade mecânica. Para se poder aproveitar esta capacidade dos materiais, estes são produzidos em formato de fibras, as falhas na sua construção continuam a existir mas desta forma em caso de falha, estas só afectam umas determinadas fibras e não o conjunto todo, desta forma pode-se aplicar estas e aproveitar a potencial capacidade mecânica teórica das restantes fibras. Mas tem que se ter em conta que estas

propriedades só são aplicáveis ao longo da componente longitudinal da fibra e não na transversal.

Devido a esta característica das fibras, de vidro, de carbono ou de aramida, que combinadas com uma resina, permitem obter o aproveitamento das características da fibra na construção de elementos estruturais. A aplicação da resina serve para distribuir a carga aplicada no compósito pelas fibras existentes e além disso protege as mesmas de elementos abrasivos e de impactos que possam ocorrer. As grandes capacidades mecânicas que podem apresentar, a facilidade de moldagem a diferentes geometrias, a capacidade de resistir a ambientes desfavoráveis aliado a um baixo peso da peça construída, fazem dos compósitos, elementos superiores mecanicamente muitas vezes relativamente aos metais para a mesma peça.

O compósito, como dito anteriormente, é a junção de dois elementos, e devido a esta, o resultado é a combinação das propriedades dos dois elementos usados. Propriedades da resina com as propriedades da fibra, podemos observar na figura 3.3, o resultado da junção dos dois elementos.

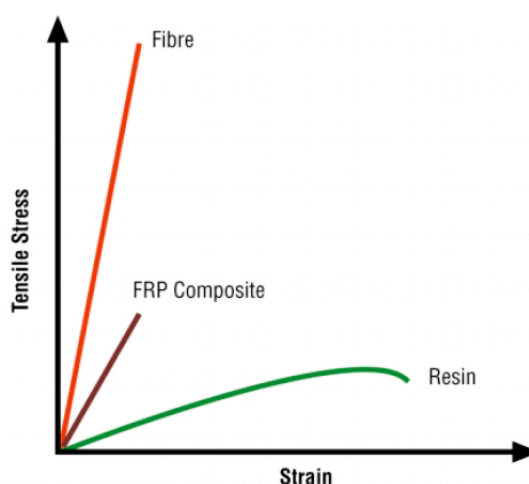


Figura 3-3 – Gráfico da junção da resina com a fibra (SP Systems).

Dado que as propriedades estruturais de um compósito dependem de diversos factores, tais como: as propriedades da resina, as propriedades do tipo de fibra

(carbono, vidro, aramida), a quantidade de fibra versus quantidade de resina, a orientação das fibras no compósito e sua geometria, e o tipo de processo de cura do compósito também confere determinadas propriedades mediante as condições adjacentes ao processo. Devido a esta grande capacidade de adaptação dos materiais compósitos, estes conseguem satisfazer as necessidades tecnológicas dos diversos sectores, aeronáutica, automóvel, electrónica, construção, energia e medicina biomédica.

A propriedade resultante da quantidade de fibra versus quantidade de resina, é uma componente que advém do tipo de construção usado para obter a junção da resina com a fibra, do tipo de resina usada e da orientação das fibras. Como a fibra normalmente tem propriedades superiores às da resina, quanto maior for a quantidade de fibras existentes, maiores serão as propriedades do compósito resultante. Na construção tem que se ter em conta que as fibras devem estar completamente cobertas pela resina e evitar a criação de bolhas de ar e imperfeições que possam ocorrer. É um processo que precisa de ser muito metódico na sua realização.

As geometrias a que as fibras podem ser aplicadas, também têm que ser alvo de um critério rigoroso no processo de se construir o compósito. Dado que as propriedades da fibra só conseguem ser aproveitadas longitudinalmente, quando as forças são aplicadas no compósito deve-se ter o cuidado de estas serem aplicadas na componente longitudinal das fibras. Por isso na fase de projecto de uma peça em compósito deverá ser efectuado o estudo das direcções em que as forças vão actuar, de modo a se colocar as fibras nesses sentidos para se aproveitar o seu potencial máximo. Esta orientação pode ser definida como sendo um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direcção e um alinhamento totalmente aleatório.

Algumas propriedades dos materiais compósitos retiradas dos diversos autores consultados:

- Baixa densidade;

- Boa resistência à tração;
- Boa resistência à compressão;
- Boa resistência à fadiga;
- Bom coeficiente de fricção e boa resistência ao desgaste;
- Boa resistência à corrosão.
- Boa resistência mecânica específica.

3.1.1. Compósito laminado

A figura 3.4 apresenta dois casos possíveis de orientação das fibras para um compósito laminado: na figura 3.4 a), unidireccional, tem-se todas as camadas de fibras na mesma direcção, a sequência de empilhamento é de zero graus. Na figura 3.4 b), quase-isotrópico, tem-se as camadas de fibras com ângulos dispostos em direcções diferentes, a sequência de empilhamento é $[0/90/\pm 45]_s$. Os empilhamentos podem ser dispostos com diversas configurações de modo a ter-se as características mecânicas do compósito na direcção desejada.

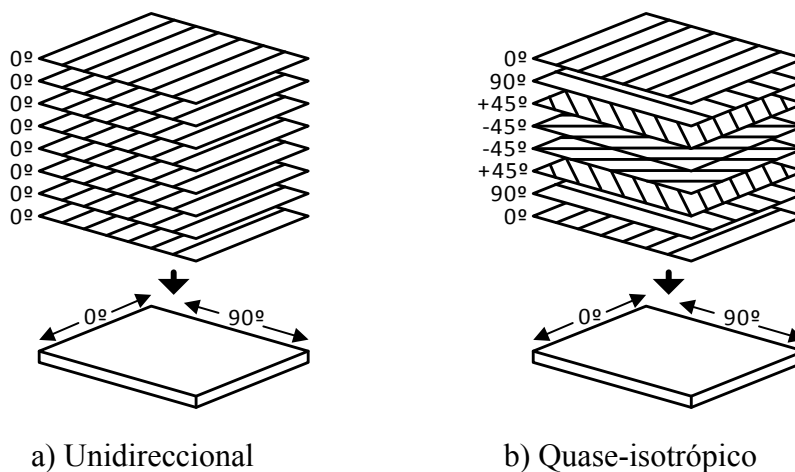


Figura 3-4 – Representação de esquema de empilhamento a) Unidireccional e b) Multidireccional.

3.1.2. Compósito em Sanduiche

Os compósitos em Sanduiche descritos no guia da SP Systems, são obtidos pela junção de duas camadas de compósito ("skin") separadas por um material no núcleo ou "core", ver figura 3-5, que confere um aumento da rigidez do compósito, ao mesmo tempo que lhe confere uma maior espessura isto devido ao material usado no "core", normalmente com uma baixa densidade. Isto pode proporcionar um grande aumento de rigidez sem no entanto aumentar o peso da estrutura.

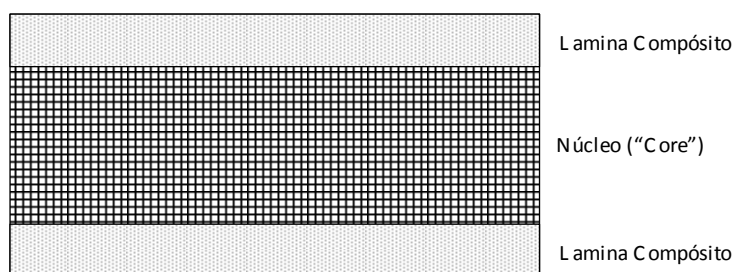


Figura 3-5 – Compósito em Sanduiche.

O material usado para o "core" pode ser:

- **Espuma**, estas são das mais usadas, dado que podem ser produzidas de uma variedade enorme de polímeros sintéticos, podendo ser o PVC, o poliuretano, o acrílico, entre outros. Estes podem ser fabricados com densidades compreendidas entre os 30 kg/m^3 a mais de 300 kg/m^3 , e espessuras compreendidas entre os 5 mm e os 50 mm.
- **"Honeycomb"**, este tipo de núcleo ou "core" pode ser fabricado com papel ou cartão, se se pretender ter baixa rigidez e para baixas cargas, ou então com alumínio para obter uma grande rigidez como no caso de estruturas de aviões, em que se pretende uma estrutura rígida e ao mesmo tempo com baixo peso. Também se pode usar ainda termoplásticos, madeira e balsa.

3.2. Cargas Aplicadas

Existem quatro tipos de cargas a que um compósito pode estar sujeito.

- **Tracção**

O comportamento do compósito a cargas de tracção, é muito dependente das propriedades mecânicas do tipo de fibra usada na sua construção, uma vez que estas são superiores às propriedades da resina. Ver figura 3.6, exemplo de aplicação de carga à tracção.

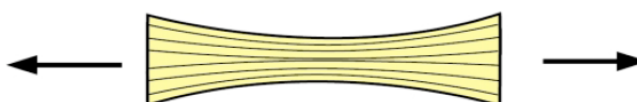


Figura 3-6 – Exemplo de aplicação de carga à tracção (SP Systems).

- **Compressão**

Neste caso o comportamento do compósito a cargas de compressão, é mais dependente das propriedades mecânicas do tipo de resina usada na sua construção, as suas propriedades adesivas e rigidez, são cruciais para manter as fibras orientadas e não permitir a sua deformação. Ver figura 3.7, exemplo de aplicação de carga à compressão.

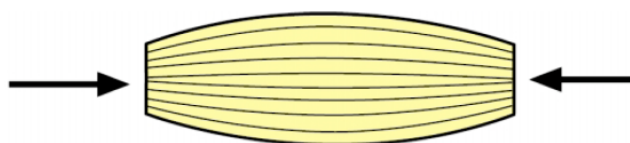


Figura 3-7 – Exemplo de aplicação de carga à compressão (SP Systems)

- **Corte**

Este tipo de carga tenta que as diferentes camadas de fibras deslizem entre elas e provoquem a sua rotura. Neste caso a resina tem o papel principal, pois é esta que distribui a carga aplicada pelas diferentes camadas das fibras existentes no compósito. Para se ter uma boa capacidade ao corte, a resina tem de ter muito boas propriedades mecânicas e boas propriedades adesivas às camadas das fibras. Ver figura 3.8, exemplo de aplicação de carga ao corte.

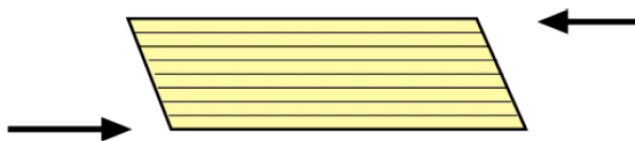


Figura 3-8 – Exemplo de aplicação de carga ao corte (SP Systems).

- **Flexão**

Esta carga aplicada é uma junção das três cargas anteriormente descritas. Ver figura 3.9, exemplo de aplicação de carga à flexão. Pela observação da figura vemos a aplicação de uma carga de tracção na parte de baixo do compósito, na parte de cima temos uma carga à compressão e a aplicação destas duas resulta numa carga de corte nos pontos médios.

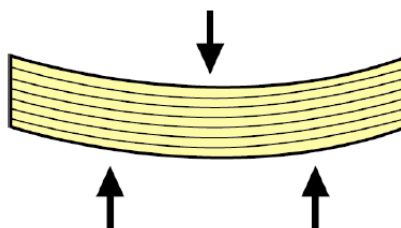


Figura 3-9 – Exemplo de aplicação de carga à flexão (SP Systems).

3.3. Resinas

As resinas representam o elemento de junção das fibras, e para cumprirem a sua função têm de ter as seguintes propriedades:

- **Boa propriedade mecânica.**

A figura 3.10, apresenta o gráfico tensão vs. extensão genérico para as fibras e resina (matriz) de um compósito. Podemos observar como se comporta a resina no compósito quando este está sujeito a um aumento gradual da carga aplicada em quatro fases, segundo Jones (1999).

Fase 1 - Assistimos à deformação elástica tanto da fibra como da resina.

Fase 2 - As fibras continuam a deformar elasticamente, mas a resina deforma plasticamente.

Fase 3 - A fibra e a resina deformam plasticamente.

Fase 4 - As fibras atingem a rotura, e a resina ainda permite uma pequena deformação atingindo depois a sua rotura.

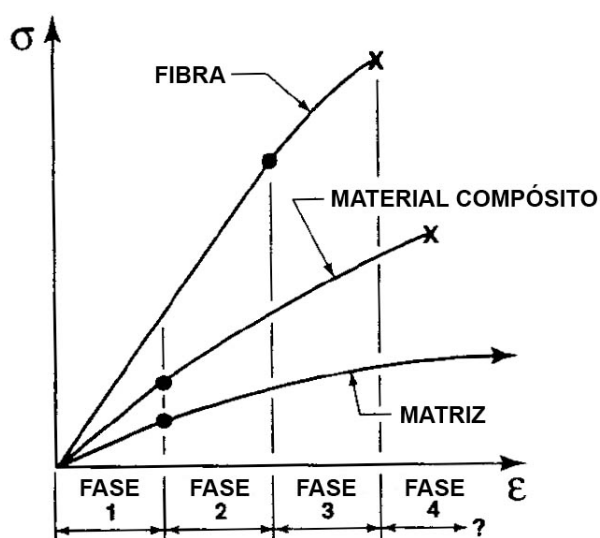


Figura 3-10 – Fases de extensão de um compósito
(Jones, 1999, gráfico adaptado).

Quando temos um compósito em carga, para as propriedades da fibra serem aplicáveis, temos que ter uma resina que consiga deformar o equivalente à deformação máxima permitida pela fibra usada. Pela observação da figura 3.11, que mostra a deformação até à rotura de alguns tipos de fibra usados, podemos dar o exemplo que uma fibra S-Glass, com um alongamento de rotura de 5.3%, vai ser necessário aplicar uma resina com o mesmo factor de alongamento até à rotura, de modo a se poder usar as propriedades da fibra até ao seu ponto de rotura. Também visto na figura 3.10.

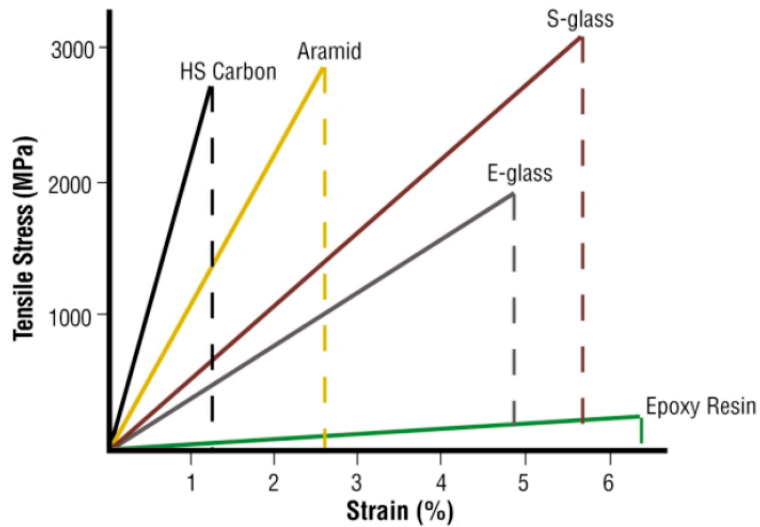


Figura 3-11 – Gráfico da deformação até à rotura (SP Systems).

- **Boa propriedade adesiva.**

Uma boa capacidade adesiva por parte da resina às fibras do compósito, é essencial. Pois a sua função é fazer a distribuição das cargas pelas fibras existentes, e não permitir o aparecimento de quebras entre fibra e resina criando pontos de quebra inter-laminares.

- **Boa rigidez.**

A rigidez de um material, é uma medida que mostra a capacidade à deformação elástica que este suporta. Mas pela curva de tensão vs. extensão de uma resina pode-se prever qual será o comportamento do compósito. É importante adaptar a propriedade de alongamento da resina à propriedade de alongamento da fibra a usar.

- **Boa resistência ao meio ambiente.**

A resina a usar, como qualquer material metálico usado, também tem que ter nas suas propriedades uma boa resistência a meio ambiente agressivo, de modo a não se degradar e levar à rotura facilmente.

3.3.1. Tipos de Resinas

As resinas que se usam nos compósitos são normalmente chamadas de polímeros. Todos os polímeros têm a mesma propriedade, dado que são compostos por uma longa cadeia de moléculas que se repetem em pequenas unidades. Os polímeros criados pelo homem, são chamados de “resinas sintéticas” ou simplesmente de “resinas”. Estes podem ser classificados como “termoplásticos” ou “termoendurecíveis”, dependendo da influência que o calor tiver nas suas propriedades.

Os termoplásticos são como os metais, amaciam com o calor, ou até derretem e depois voltam a solidificar com o frio. Podendo sofrer estas alterações térmicas várias vezes que as suas propriedades não alteram significativamente.

Os termoendurecíveis são formados por uma reacção química, em que existe um elemento base (a resina) e o catalisador, que ao se juntarem formam uma reacção química que leva ao endurecimento dos mesmos. Neste caso não existe possibilidade de reverter o processo, se for aplicada uma fonte de calor ao mesmo este não se derrete, mas pode alterar as suas propriedades mecânicas ao ponto de ficar danificado, e não ser possível usar o mesmo para o serviço a que estava destinado.

Existem muitos tipos de resina no mercado, mas as mais usadas na indústria são: o poliéster, as vinilester e as epóxi, como referido no guia de compósitos da SP Systems.

- **Resina de Poliéster**

As resinas de poliéster são das mais usadas nos diversos sistemas de compósitos criados. Principalmente na indústria naval, é usado este tipo de resina para cobertura de elementos nos barcos. Estas resinas são do tipo insaturado, tem a capacidade de se submeterem ao processo de cura estando no estado sólido ou líquido, desde que as condições óptimas se cumpram.

- **Resina Vinilester**

Estas resinas são similares ao poliéster, e devido à sua estrutura molecular, absorvem melhor os impactos, e por isso são mais resistentes e flexíveis do que as de poliéster. Também são mais resistentes à água e a outros químicos, sendo por isso encontradas em pipelines e tanques de armazenagem de químicos.

- **Resina Epóxi**

As resinas epóxi são as que apresentam melhor “performance” e que se usam mais na indústria. Normalmente são resinas que têm melhores propriedades mecânicas e melhor resistência contra a degradação em meios ambientes agressivos. São muito usadas na indústria aeronáutica e também na indústria náutica para a construção de barcos de grande “performance”.

Apresenta-se na tabela 3.1, as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de resina.

Tabela 3-1 – Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de resina (SP Systems).

Tipo de resina	Vantagens	Desvantagens
Poliéster	<ul style="list-style-type: none">- Fácil de usar.- Baixo custo de compra da resina.	<ul style="list-style-type: none">- Propriedades mecânicas moderadas.- Contração elevada aquando da cura.- Em moldes abertos tem uma alta emissão de componentes voláteis de estireno.

Tipo de resina	Vantagens	Desvantagens
Vinilester	<ul style="list-style-type: none">- Boa resistência a químicos e meios ambiente abrasivos.- Melhores propriedades mecânicas que os poliéster.	<ul style="list-style-type: none">- Para melhores propriedades mecânicas necessita de uma cura posterior.- Elevado conteúdo de estireno.- Mais cara que os poliésteres.- Contração elevada aquando da cura.
Epóxi	<ul style="list-style-type: none">- Boas propriedades mecânicas e térmicas.- Boa resistência à água.- Resistência à temperatura até 140°C em ambiente molhado e 220°C em ambiente seco.- Pouca contração aquando da cura.	<ul style="list-style-type: none">- Mais cara que as vinilester.- Mistura dos elementos critica.- Manuseamento de elementos corrosivos.

3.4. Fibras

Num compósito, a adição de elementos no mesmo é simplesmente para se melhorar as suas propriedades mecânicas. Todos os tipos de fibras usadas nos compósitos (carbono, vidro ou aramida), têm as suas próprias propriedades e deste modo afectam as propriedades finais do compósito de maneiras diferentes.

As propriedades que se pretendem que uma fibra tenha são: a propriedade mecânica da própria fibra, proporcionar uma boa superfície de interação entre fibra e resina (relação inter-laminar), a quantidade de fibra no compósito e a orientação das fibras no compósito.

As propriedades mecânicas das fibras mais usadas podem ser vistas na tabela 3.2 (referido no Guia de Compósitos da SP Systems), propriedades básicas das fibras. A interação entre a fibra e a resina é controlada pela capacidade de adesão entre elas, dependendo do tipo de tratamento de superfície que tenha sido feito à fibra. A quantidade de fibra no compósito depende do processo de fabricação do mesmo, sabendo que com o aumento da quantidade de fibra, aumenta a rigidez e a resistência do laminado. E como as fibras têm as suas propriedades ótimas longitudinalmente, as cargas aplicadas num compósito devem ser no mesmo sentido que o das fibras de modo a se tirar o seu potencial máximo. Evitando deste modo a colocação de material extra em zonas que não sofrem cargas, logo que só iriam tornar o compósito mais pesado.

Material Type	Tensile Str. (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Typical Density (g/cc)	Specific Modulus
Carbon HS	3500	160 - 270	1.8	90 - 150
Carbon IM	5300	270 - 325	1.8	150 - 180
Carbon HM	3500	325 - 440	1.8	180 - 240
Carbon UHM	2000	440+	2.0	200+
Aramid LM	3600	60	1.45	40
Aramid HM	3100	120	1.45	80
Aramid UHM	3400	180	1.47	120
Glass - E glass	2400	69	2.5	27
Glass - S2 glass	3450	86	2.5	34
Glass - quartz	3700	69	2.2	31

Tabela 3-2 – Propriedades básicas das fibras (SP Systems).

3.4.1. Tipos de Fibras

As fibras a usar para a execução de compósitos estruturais, podem ser como descrito no Guia de Compósitos da SP Systems, do tipo:

- **Fibras de vidro.**

Este tipo de fibra é utilizado largamente na construção de compósitos, tendo muitos tipos de aplicações possíveis. É uma fibra de fácil construção, em que a partir do seu estado fundido se consegue obter fibras de alta resistência. Como fibra possui boas propriedades mecânicas e inseridas numa matriz de resina produz peças com resistências elevadas. Apesar de estes compósitos terem uma boa resistência, não são muito rígidos e por isso não são adequados a todos os tipos de aplicações. São normalmente usados em peças para automóveis, tubos de plástico e recipientes para armazenamento.

- **Fibras de Carbono**

O carbono é usado quando se pretende um compósito com uma estrutura de maior desempenho. As suas fibras têm maior resistência específica de todas as fibras; as fibras de carbono têm uma boa resistência a temperaturas elevadas; normalmente as fibras não são afectadas pelo meio envolvente ou por alguns químicos. Compósitos com fibras de carbono, podem ser encontrados em estruturas de aviões, e em diversos equipamentos recreativos.

- **Fibras de aramida**

Estas fibras são conhecidas pela sua boa componente à tracção longitudinal, mas têm uma fraca componente de compressão. São comumente usados em compósitos que sejam submetidos a impactos, à flexão e à fadiga, pois as suas propriedades são as mais adequadas a este tipo de esforços. Normalmente são usados com resinas do tipo epóxi ou poliésteres. Como as fibras são flexíveis e dúcteis, permitem ser processados de acordo com operações têxteis mais

comuns. São normalmente usadas em coletes à prova de bala, artigos desportivos e pneus.

4. FURAÇÃO DE COMPÓSITOS

Os compósitos para poderem ser aplicados em estruturas, têm de ser submetidos a operações de maquinação. Uma dessas operações é a furação, que é semelhante à furação de metais. Os métodos usados e as ferramentas para a realização dos furos têm que ser adequados ao compósito que se pretende maquinar. A furação de um compósito serve para:

- Criar os furos que não se conseguem obter aquando da construção do compósito.
- A furação é feita para permitir a junção entre duas peças.

A furação, apesar de necessária para alguns componentes, também tem algumas desvantagens, segundo o autor Sanjay (2002):

- A criação de furos no compósito, provoca descontinuidades na fibra e afecta o comportamento do compósito.
- O furo expõe as fibras a químicos e meios ambientes agressivos.
- A temperatura durante a realização dos furos não deve exceder a temperatura de cura do compósito, para não alterar as suas propriedades. E até porque o material compósito tem um índice de condutividade térmico muito baixo.
- A vida útil das ferramentas usadas é muito baixa devido à natureza abrasiva do material compósito. Por esse motivo as ferramentas devem ser revestidas a carboneto de tungsténio, nitrato de titânio ou a diamante, para aumentar a vida útil da ferramenta.
- A delaminação nas arestas do furo, devem ser examinadas de modo a prever a sua extensão nas fibras do compósito.

4.1. Ferramentas de Corte

As ferramentas de furação usadas nos metais, são similares às usadas nos compósitos. Mas as ferramentas HSS (high speed steel) usadas para os compósitos estão revestidas a carboneto de tungsténio, nitrito de titânio ou a diamante de modo a

evitar o excessivo desgaste da ferramenta. As ferramentas HSS sem qualquer revestimento conseguem fazer furos razoáveis, mas depressa se desgastam e a qualidade do furo decresce.

Na vida de uma ferramenta, as revestidas a carboneto são superiores, mas os custos destas também aumentam. As revestidas a diamante são as melhores a nível de desgaste da ferramenta, mas custam muito mais que as de carboneto. A figura 4.1 mostra algumas ferramentas usadas na furação de compósitos.



Figura 4-1 – Tipos de ferramentas (Sandvik Coromant Co.).

A escolha da ferramenta correcta e do seu revestimento, é crítica para uma boa qualidade do furo. Tsao e Hocheng (2004) compararam diversas geometrias de ferramentas na furação para comparar a influência das mesmas na delaminação.

4.2. Furação

A furação é realizada de modo a criar furos no compósito, para a aplicação de parafusos ou rebites, ou criar passagem de líquidos ou fios através do compósito. Na furação de compósitos o calor gerado na operação de furação é mantido em níveis baixos devido a não criar degradação da fibra e da resina devido ao calor. A formação de aparas na furação, são de fácil remoção devido a estas serem muito

pequenas. A furação também cria delaminação nas arestas do furo, esta será referida no ponto 4.4.

A operação de furação tem sido método de estudo de diversos autores (Ho-Cheng et al. 1990, Jain et al. 1994, Stone et al. 1996, Nobe et al. 1998, Capello et al. 2001, Goncalves et al. 2011), e através de diversos estudos foi demonstrado que a força axial na furação de compósitos é uma das causas fundamentais da delaminação.

4.3. Força Axial

A força axial durante a operação de furação, é considerada como uma das variáveis que mais influenciam a delaminação e a qualidade nos furos (Khashaba et al. 2010). O tamanho da zona de delaminação que aparece na realização de furos está relacionada com a força axial existente durante a furação de compósitos laminados, e é admitido que é possível existir um valor abaixo do qual não existe delaminação (Hocheng et al. 2005). O primeiro modelo analítico para determinar a força axial crítica foi criado por Hocheng e Dharan (1990). Este modelo era baseado na emprego de fractura mecânica linear elástica para obter a força axial crítica para uma broca helicoidal. Neste modelo a força era considerada como uma carga concentrada através do centro da ponta da broca, e dependendo das propriedades do compósito.

$$F_C = \pi \cdot \left[\frac{8G_{Ic}ICEh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Em que a F_C é a força crítica para a ocorrência de delaminação, G_{Ic} é a taxa crítica de libertação de energia em modo I, E é o módulo de Young, h é a espessura não cortada e ν é o coeficiente de Poisson.

Mas a força axial não é aplicada só num ponto central da broca como sendo uma força concentrada, mas sim também através das arestas de corte da broca. Deste modo a força axial crítica por Hocheng e Dharan (1990), foi modificada por Upadhyay e Lyons (1999), assumindo que é distribuída uniformemente pelas arestas

da broca e não como uma carga concentrada. Lachaud et al. (2001) também apresentam uma equação para uma carga distribuída:

$$F_C = 8\pi \cdot \left[\frac{2G_{Ic}D}{\left(\frac{1}{3}\right) - (D'/8D)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Em que D e D' são constantes do material calculadas a partir da matriz de rigidez à flexão do laminado.

Das experiências efectuadas em (Tsao et al. 2004, Hocheng et al. 2006 e Khashaba et al. 2010), os resultados confirmaram que para se obter uma menor delaminação na furação dos compósitos, se deve baixar a força axial, através da optimização das variáveis adjacentes ao processo de furação.

4.4. Dano na Furação

A furação é uma operação complexa que se caracteriza pela existência de mecanismos de extrusão, realizado pela ponta da broca, devido à velocidade ser quase nula, e ao mecanismo de corte, provocado pelas arestas cortantes em movimento de rotação a uma determinada velocidade.

Devido à natureza dos compósitos serem não homogêneos e anisotrópicos, os tipos de dano mais frequentes na furação de um compósito referidos em diversos artigos da especialidade, são:

- Delaminação à entrada ou saída;
- Fissuras inter-laminares;
- Fissuras intralaminares;
- Descolamento da fibra/matriz;
- As alterações térmicas;
- Desgaste rápido da ferramenta de corte.

A delaminação à entrada e à saída é considerada como o dano mais importante a considerar num compósito, esta foi objecto de análise no capítulo 2.

4.5. Redução de Dano na Furação de Compósitos

De modo a evitar a delaminação na furação de compósitos, a força axial aplicada na peça, não deve exceder a força teórica dos modelos propostos pelos diferentes autores. Em geral a força axial crítica é função das propriedades do material do compósito e da geometria da broca. Já diversos autores procuraram métodos de furação livre de delaminação, uns fazendo com que a força axial aumentasse e outros com a diminuição da mesma.

- **Uso de Pratos de Suporte**

A delaminação na furação pode ser reduzida utilizando pratos de suporte do compósito aquando da furação do mesmo, prevenindo que o compósito deforme e levando a que a delaminação à saída seja menor. Os resultados obtidos por Capello (2004), numa furação com e sem prato de suporte por de baixo do compósito, demonstraram que reduzia drasticamente a delaminação à saída. Também Tsao e Hocheng (2005), obtiveram a mesma conclusão no estudo que fizeram.

- **Uso de pontas especiais nas brocas**

Dado que as brocas helicoidais usadas na furação de compósitos, tem uma grande força axial e uma força axial crítica baixa, é difícil para este tipo de broca convencional obter uma zona livre de delaminação (Jain 1994). Para minimizar a delaminação induzida na furação, diversas brocas com pontas especiais foram desenvolvidas, incluindo "straight-flute drill bit" (Piquet et al. 2000), "step drill bit" (Tsao et al. 2008), "core drill bit" (Jain et al. 1994 e Tsao et al. 2007), e "step-core drill bit" (Tsao, 2008). As vantagens deste tipo de brocas especiais comparado com a broca helicoidal notam-se quando a delaminação obtida é inferior à obtida pela broca convencional.

- **Uso de pré-furação**

Com um pré-furo, efectuado no material compósito, a delaminação induzida pode ser reduzida significativamente de acordo com os autores Tsao e Hocheng usando brocas helicoidais (Tsao et al., 2003) e usando core drill bit (Tsao, 2006). Esta pode ser uma boa técnica para se aplicar na furação de compósitos com grandes avanços e sem delaminação.

- **Uso do método KTH ou furação orbital**

A abertura do furo é realizada nas direcções axial e radial ao mesmo tempo, rodando a ferramenta de corte em torno do seu eixo principal enquanto se mantém o movimento de avanço na direcção do laminado. De acordo com Zackrisson et al. (1997), este método permitiu melhorar em 11% a resistência estática e 19% a resistência à fadiga, quando comparado com a furação convencional.

5. JUNTAS EM MATERIAL COMPÓSITO

Na construção de um qualquer produto, existem várias peças que se ligam umas às outras através de um determinado processo de união. Estas partes estão interligadas entre elas de modo a obter um produto final. A função principal das juntas é a de transferir as cargas aplicadas de um elemento para outro, mas também pode servir para criar movimento relativo entre dois elementos.

As juntas são normalmente evitadas na construção de estruturas, devido a esta ser um ponto de concentração de tensões e por isso ser um local propenso a falhas. Por causa disso as juntas devem ser evitadas na construção de estruturas. As desvantagens das juntas são:

- A junta é um ponto de concentração de tensões. Cria uma descontinuidade na transferência das cargas.
- A criação de juntas é um processo intensivo, é necessário seguir determinados parâmetros de modo a se conseguir uma junta aceitável.
- As juntas acrescentam tempo de construção, logo, mais custos na produção.

O produto ideal é composto por uma só peça, e os materiais compósitos vieram dar essa oportunidade aos fabricantes, por ser possível adaptar este material a diferentes geometrias e ficando com uma só peça, reduzindo assim o número de peças para uma determinada estrutura.

Existem dois tipos de juntas nos materiais compósitos:

- Juntas adesivas;
- Juntas mecânicas.

Juntas adesivas são a junta mais usada na construção de estruturas com compósitos. Neste tipo de junta é feita a junção através de um componente adesivo entre as duas superfícies. Nas juntas mecânicas temos um processo similar ao usado para os metais, sendo usados rebites, parafusos e porcas para formar a junta. Cada tipo de

junta tem as suas vantagens e desvantagens, cabendo ao projectista determinar qual o melhor tipo de junta a usar para a aplicação a que o compósito irá estar sujeito.

5.1. Juntas Adesivas

Nas juntas adesivas, as superfícies de dois materiais são juntas por um tipo de adesivo (epóxico ou poliuretano). Vários tipos de juntas adesivas são mostrados na figura 5.1.

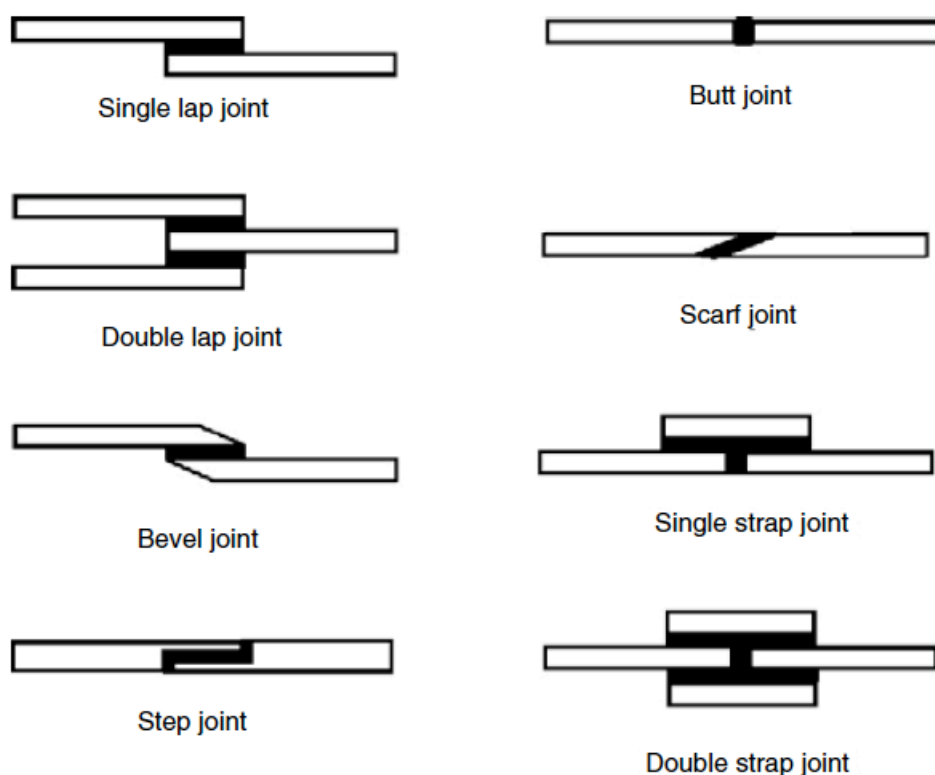


Figura 5-1 – Tipos de junta adesiva (Sanjay, 2002).

O tipo de junta mais usual é o de “single lap joint” (junta simples), onde se tem a carga a ser transferida de uma peça para a outra através de esforços de corte na zona adesiva. No entanto como as cargas aplicadas normalmente não estão centradas, ver figura 5.2, numa junta simples, a acção de flexão da junta adesiva devido à aplicação da carga, cria uma tensão normal na direcção da espessura do adesivo, levando à

rotura deste. A combinação de esforços de corte com a força normal de carga, neste tipo de junta simples, reduz a sua resistência. Por isso é preferível usar a “double lap Joint” (junta dupla), evitando o efeito de flexão, no local do adesivo. Neste tipo de junta as forças de flexão e normais são eliminadas. Na seleção do tipo de junta adesiva a usar e sua caracterização, normalmente usa-se a junta simples por ser mais simples de fabricar. A junta “scarf” e a junta “step” fornecem maior resistência do que a junta simples, mas são mais difíceis de executar devido à geometria necessária na peça a juntar.

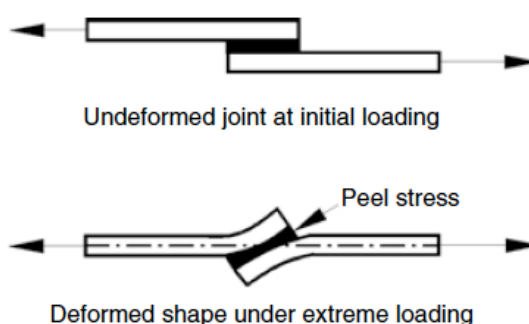


Figura 5-2 – Junta com aplicação de carga (Sanjay, 2002).

5.1.1. Modo de Falha nas Juntas Adesivas

As falhas que podem ocorrer nas juntas adesivas são: falhas adesivas e falhas de coesão, como mostrado na figura 5.3. A falha adesiva é a falha entre o interface do aderente e do adesivo. A falha de coesão pode ocorrer no aderente ou no adesivo. A falha de coesão ocorre quando a ligação entre o adesivo e o material do aderente é maior que a resistência interna do adesivo ou do aderente.

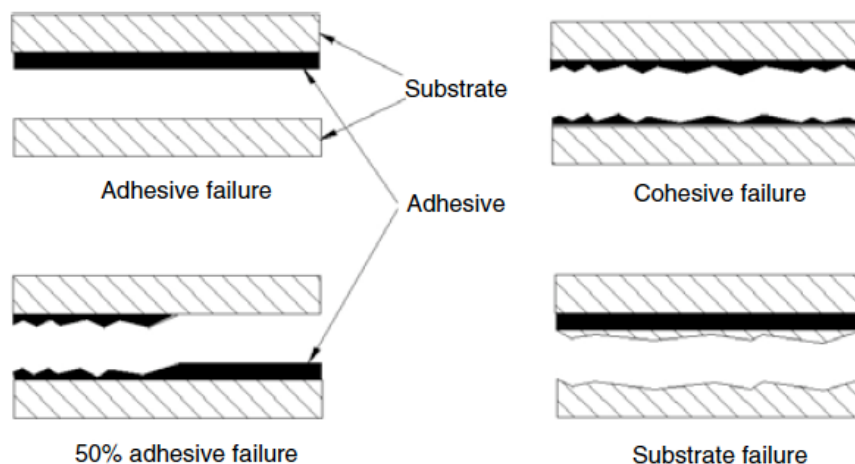


Figura 5-3 – Tipos de falha adesiva (Sanjay, 2002).

Na ocorrência de uma falha na ligação, é sempre preferível que seja uma falha por coesão, porque neste caso a ligação (o adesivo usado) tem propriedades superiores às dos materiais usados. Neste tipo de falha são os materiais dos aderentes que se rompem, perto da zona adesiva ou longe desta. Outro tipo de falha de coesão que também pode ocorrer é a falha no adesivo, quando este se separa através da sua espessura mas mantém-se ligado aos aderentes. Na falha adesiva, quando o adesivo se separa da base do aderente, esta é considerada como uma ligação fraca e geralmente é inaceitável.

5.1.2. Vantagens das Juntas Adesivas

As junções de materiais usando juntas adesivas, oferecem diversos benefícios comparativamente com as juntas mecânicas, sendo estas referidas pelo autor Sanjay (2002).

- Na junta adesiva as cargas aplicadas são distribuídas na zona de adesão e não num só ponto de ligação. Isto favorece uma distribuição uniforme das cargas no material.
- As juntas adesivas são mais resistentes à flexão, à fadiga, e a vibrações do

que as juntas mecânicas, por causa da distribuição das cargas.

- A junta adesivo não só junta as peças como sela a junta, evitando assim a criação de corrosão entre os materiais.
- A junta adesiva consegue adaptar-se à junção de superfícies irregulares.
- A junta adesiva favorece os contornos suaves e virtualmente não existem relevos nas peças. Isto é muito importante para a criação de formas aerodinâmicas e com bom aspecto.
- Normalmente são juntas mais baratas e mais rápidas de se efectuar.

5.1.3. Desvantagens das Juntas Adesivas

As desvantagens segundo o autor Sanjay (2002), para as juntas adesivas são:

- Juntas adesivas normalmente precisam de uma preparação das superfícies a juntar.
- Calor e pressão podem ser necessários para a adesão. Isto pode limitar o tamanho das peças se tiverem que ser curadas em forno ou autoclave.
- Para alguns adesivos pode ser necessário um maior tempo de cura.
- A saúde e a segurança podem ser um problema.
- A inspecção de uma junta adesiva é complicada.
- Juntas adesivas necessitam de mais treino e processos mais controlados do que as juntas mecânicas.
- As juntas adesivas criam uma ligação permanente e não permite desmontagem das peças.

5.1.4. Regras para Aplicação de Juntas Adesivas

O autor Sanjay (2002) enumera as seguintes regras a seguir para a aplicação de juntas adesivas:

- Desenho da junta de modo a transferência de carga ser predominantemente à torção ou à compressão.

- Seleccionar o material adesivo correcto consoante as aplicações necessárias (resistência à temperatura, resistência química, etc.).
- Desenho da junta de modo a facilitar a produção. A área de adesão deverá ser de fácil acesso e os técnicos devem poder conseguir fazer a preparação da superfície e adesão com o mínimo esforço possível.
- Usar o máximo de área possível para a adesão de modo a minimizar as tensões na junta.
- Quando se juntam materiais diferentes, as tensões provocadas pela expansão térmica e contracção devem ser consideradas no projecto da junta.
- Existe uma espessura óptima de material adesivo para criar a melhor adesão possível. Demasiado fino ou demasiado espesso, provoca uma má ligação entre materiais.

5.2. Juntas Mecânicas

As juntas mecânicas são as mais usadas na junção de componentes metálicos. Tipos de juntas mecânicas com junção feita por: rebites, parafuso e porca. Estas juntas nos compósitos são similares às realizadas nos componentes metálicos. Para a maioria das juntas mecânicas é necessário a realização da sobreposição dos materiais a juntar e efectuar um furo na sobreposição para a introdução do parafuso ou do rebite. Quando se tem um furo num compósito este não tem uma capacidade muito grande ao corte e por esse motivo usam-se os parafusos para este tipo de junta. A figura 5.4 mostra o tipo de juntas mecânicas.

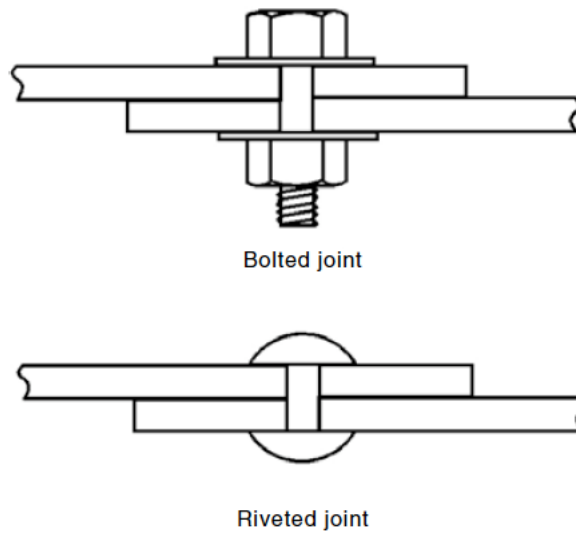


Figura 5-4 – Tipos de junta mecânica (Sanjay, 2002).

Nas juntas aparafusadas, o parafuso, a porca e as anilhas são parte da junta. Na junta com rebites, estes são metálicos. As juntas mecânicas podem ser “simple lap joints” (juntas simples), “double lap joints” (juntas duplas) e “butt joints” (juntas de topo), como se pode observar na figura 5.5.

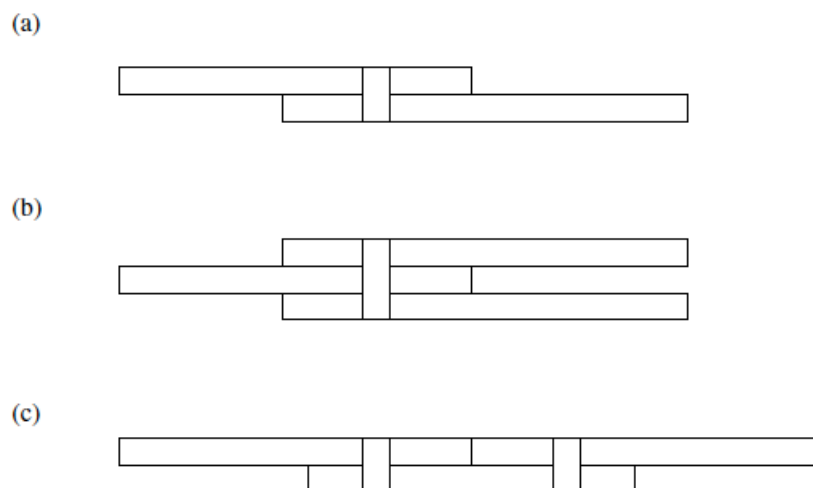


Figura 5-5 – Tipos de juntas mecânicas, (a) junta simples, (b) junta dupla e (c) junta de topo (Sanjay, 2002).

5.2.1. Vantagens das Juntas Mecânicas

As vantagens que podemos encontrar nas juntas mecânicas, como referido pelo autor Sanjay (2002):

- Permitem repetir montagem e desmontagem para reparações e manutenção sem destruir os materiais.
- Oferecem uma fácil inspeção e controlo de qualidade.
- Requerem pouca ou nenhuma preparação de superfície.

5.2.2. Desvantagens das Juntas Mecânicas

As desvantagens que podemos encontrar nas juntas mecânicas, como referido pelo autor Sanjay (2002):

- Juntas mecânicas adicionam peso às estruturas dos compósitos, minimizando assim o ganho em peso das mesmas estruturas relativamente aos metais.
- Criam pontos de tensão residual nos furos, o que pode levar à rotura do compósito. Nos compósitos o alívio de tensões não ocorre devido à capacidade elástica destes até à rotura.
- Estas juntas podem criar problemas de corrosão galvânica por causa da presença de diferentes materiais (metal com compósito).
- Criam pontos de descontinuidade na fibra nas localizações dos furos.
- Devido aos furos, as fibras ficam expostas a químicos ou meios ambientes corrosivos.

5.2.3. Modos de Falha nas Juntas Mecânicas

Uma junta mecânica é realizada através de furos nas peças a juntar. As peças são depois alinhadas e é passado um parafuso ou rebite através do furo, e aparafusado ou rebitado. As falhas que podem ocorrer nas juntas mecânicas são, como referido pelo

autor Sanjay (2002):

- Rotura do material a juntar.
- Falha na resistência do material.
- Falha de esmagamento no material.
- Rotura no parafuso/rebite.

A falha por esmagamento do material é a mais preferida das falhas a ocorrer. Esta falha ajuda no alívio da concentração de tensões à volta do furo. As falhas de rotura no parafuso/rebite, normalmente não ocorrem porque o metal usado nestes é muito resistente à torção.

5.2.4. Parâmetros para Aplicação de Juntas Mecânicas

Os seguintes parâmetros afectam a resistência de uma junta mecânica, como referido pelo autor Sanjay (2002):

- Parâmetros construtivos do compósito, tal como a orientação das fibras, a sequência de empilhamento e o tipo de fibra.
- Os parâmetros da junta. Tamanho do furo e as distâncias entre este e os limites das peças a juntar.
- Qualidade do furo, relativamente à delaminação existente no furo.
- Força aplicada no aperto do rebite ou do parafuso.

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A preparação do ensaio a efectuar para a realização do estudo de furação na placa compósito GFRP será descrita neste capítulo. Serão indicados os materiais e equipamentos que foram utilizados nesta pesquisa para obtenção dos dados necessários, seguidos da metodologia empregue na realização da experiência prática. Os ensaios de furação foram realizados no laboratório de maquinação CNC da Área Departamental de Engenharia Mecânica do ISEL.

6.1. Material e Equipamentos

Placa de prova

A placa de prova é uma placa de material compósito polimérico pré-impregnado de resina epóxi reforçada de fibra de vidro (GFRP). A placa tem uma dimensão de 210x210 mm, com 7,5 mm de espessura. A placa laminada foi obtida pelo processo de cura em Autoclave (Temperatura T e Pressão P com Vácuo V) possuindo 15 camadas de fibra, com a sequência de empilhamento $[(0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ)]_{3s}$.



Figura 6-1 – Placa de laminado de matriz polimérica utilizada nos ensaios.

Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte usada foi uma fresa JC840 da Seco Tools com multicamada de revestimento de diamante e camada superior lisa, com $\text{Ø}6\text{mm}$, hélix dupla, comprimento de 65mm e haste cilíndrica.



Figura 6-2 – Fresa da Seco Tools.



Figura 6-3 – Vista das navalhas.

Centro de Maquinagem

O centro de maquinagem usado para a realização dos ensaios de furação, foi uma CNC Cincinatti Milacron, modelo Arrow, com potência máxima de 7,46 KW e rotação máxima de 6000 RPM.



Figura 6-4 – Centro de maquinagem CNC Cincinatti.

Sistema de Aquisição de Imagens

Como não houve acesso a um sistema mais completo para a aquisição das imagens, foi usado um scanner de digitalização com resolução máxima de 600dpi, marca OKI, modelo ES8460MFP, que só permite fazer a inspeção visual da delaminação no material.

6.2. Metodologia

O aperto da placa na máquina CNC foi feito através das garras de aperto do centro de maquinagem, de modo a que não existissem vibrações nem deslocamento da mesma.

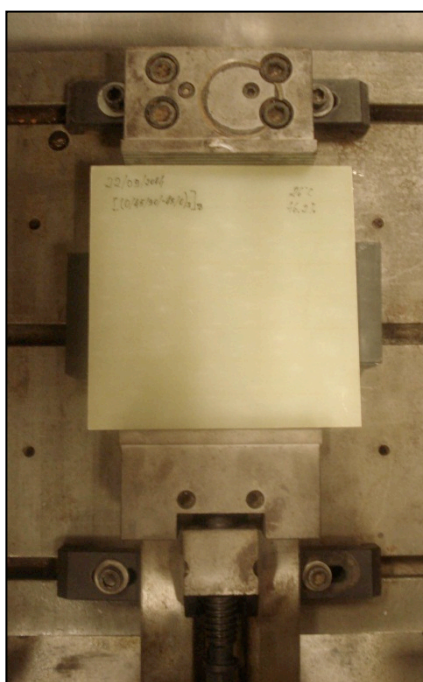


Figura 6-5 – Aperto da placa na CNC

A figura 6.6 ilustra a furação no material compósito durante os ensaios.

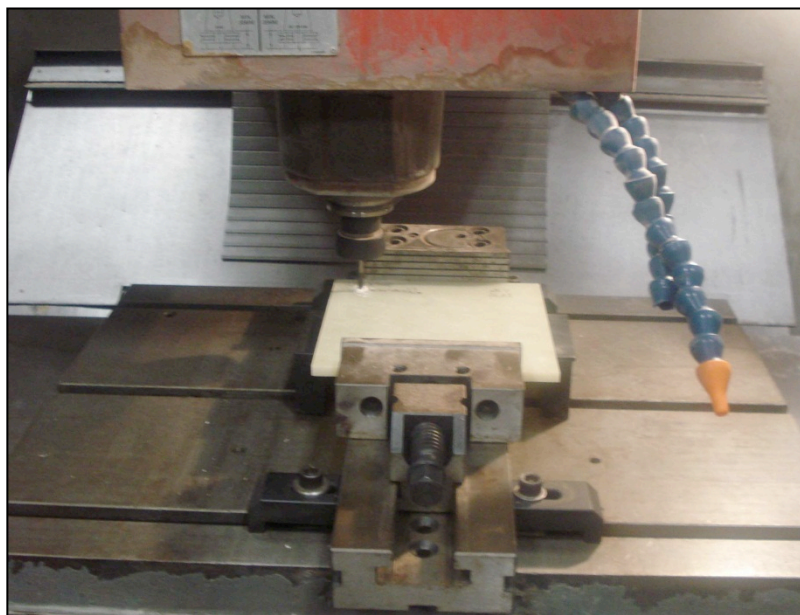


Figura 6-6 – Furação da placa de compósito.

A furação convencional (FC) foi realizada somente no plano axial, e a furação orbital (FO) foi realizada primeiro no plano axial, sendo feito um furo na placa e depois foi realizada o corte orbital. Este tipo de aproximação foi o proposto para a FO, mas podia ter sido usado outro tipo de furação orbital, como exemplo furação por degraus, em que se efectuava o furo descendo a fresa como se existisse um degrau ao longo da espessura da placa, até que chegava ao outro lado, ou então fazer a aproximação da fresa já em movimento orbital e fazer o furo por completo.

Com a placa de prova furada, foi necessário efectuar a aquisição das imagens para componente digital, de modo a poderem ser tratadas e retirados os valores obtidos. Deste modo foi feita a digitalização com o scanner de 600dpi, de seguida foi usado o programa de licença gratuita GIMP, para tratamento da imagem foi aplicado um filtro de suavização de modo a diminuir as variações bruscas de intensidade e, assim, atenuar o ruído existente. Para identificar as áreas com interesse na imagem suavizada, foi aplicada a técnica de binarização. Nos casos em que o processo de binarização originou áreas de ruído e/ou áreas subdivididas, foi aplicado um filtro de erosão seguido de um filtro de dilatação. Neste momento temos as imagens resultantes somente compostas pela área de interesse, a área delaminada em torno do

furo. Para obtenção das medidas das áreas de delaminação, foi usado o programa de licença gratuita Image J 1.46, que permitiu destacar as áreas presentes e apresentar as medidas correspondentes a estas.

Na figura 6.7 é possível ver um exemplo das diferentes fases de processamento das imagens.

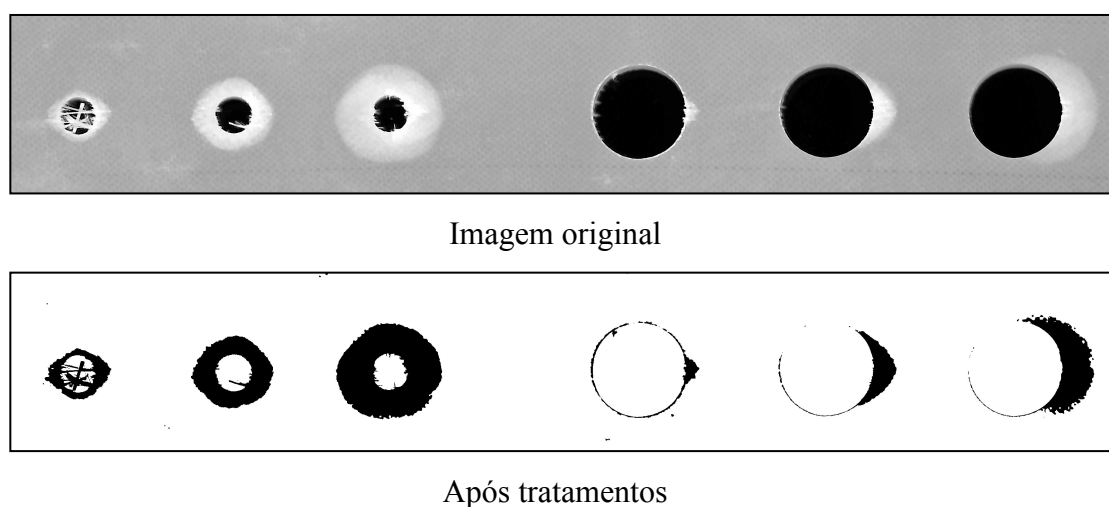


Figura 6-7 – Exemplo de fases de tratamento

O plano de experiências para o modo de FC e para a FO é o utilizado por diversos autores (Durão et al. 2006, Khashaba et al. 2007, Davim et al. 2007, J. Campos Rubio et al. 2007), é constituído por 9 ensaios em que são atribuídos três valores para a velocidade de rotação e três valores para o avanço da ferramenta, o que permite obter resultados satisfatórios para análise. A resposta a estudar neste ensaio efectuado é o factor de delaminação (F_d) (Chen 1997) e o factor de delaminação ajustado (F_{da}) (Davim et al. 2007). Com estes dois factores é possível efectuar a comparação entre a FC e a FO, principalmente através do factor de delaminação ajustado, dado que este tem em conta a área de delaminação. Como a delaminação obtida nos ensaios de FO a área delaminada não é uniforme em torno do furo nominal, foi necessário recorrer ao método criado por Davim et al. (2007), para se poder realizar a comparação dos valores obtidos de delaminação.

A tabela 6.1 ilustra os valores usados nos ensaios de FC e FO.

Tabela 6-1 – Valores usados nos ensaios de FC e de FO.

Ensaio	Avanço (mm/rot)	V_c (RPM)
1	0,03	265
2		637
3		1061
4	0,10	265
5		637
6		1061
7	0,25	265
8		637
9		1061

7. RESULTADOS E ANÁLISE

Após a realização da experiência de furação da placa de material compósito em fibra de vidro e efectuado os tratamentos de imagem referenciados no capítulo anterior para a obtenção de valores de delaminação para os dois tipos de furação usada (convencional e orbital), podemos concluir da simples observação visual da placa com os furos realizados que a FO apresenta melhores resultados que a FC sem necessidade de recorrer a cálculos de valores de F_d e F_{da} .

A quantificação dos valores obtidos para os dois tipos de furação vai primordialmente permitir a sua comparação com os resultados obtidos pelos autores referenciados e ver se os mesmos estão de acordo com os estudos anteriormente realizados. Numa segunda fase serão comparados os valores de FC vs. FO para verificação de qual o melhor método para se usar na furação de compósitos de fibra de vidro.

Como os diversos autores que efectuaram trabalhos na área da furação de compósitos, chegaram à mesma conclusão que o parâmetro que mais influência a delaminação é o avanço (a), na avaliação dos resultados obtidos e sua comparação com resultados já existentes, deu-se mais importância na comparação destes valores quando se fez variar o parâmetro avanço.

7.1. Furação Convencional

A furação convencional é a mais usada pelos fabricantes de peças em material compósito por ser mais rápida, daí também ser em grande parte objecto de estudo por uma grande variedade de autores com as condicionantes mais variadas de modo a se poder prever qual será a resposta que o material compósito evidencia perante os diferentes parâmetros usados. Nas figuras 7.1 e 7.2 podemos ver as imagens da furação à entrada e saída após o tratamento de imagem para a obter os valores de delaminação. No quadro 7.1, temos os valores de delaminação obtidos para a furação

convencional obtidos através do software Image J 1.46, com o parâmetro base para o diâmetro nominal do furo (D) de 6mm.










	0,03 mm/rot	0,10 mm/rot	0,25 mm/rot
265 RPM			
637 RPM			
1061 RPM			

Figura 7-1 – Delaminação na superfície de entrada da FC obtida por tratamento de imagem.






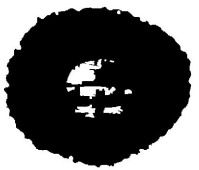


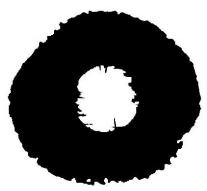
	0,03 mm/rot	0,10 mm/rot	0,25 mm/rot
265 RPM			
637 RPM			
1061 RPM			

Figura 7-2 – Delaminação na superfície de saída da FC obtida por tratamento de imagem.

Tabela 7-1 – Valores obtidos para furação convencional.

	V_c (RPM)	Avanço (mm/rot)	A_{máx} (mm²)	A_d (mm²)	A_d/(A_{máx}-A₀)	F_d	F_{da}
Entrada	265	0,03	57.818	6.039	0.204	1.430	1.556
		0,10	52.296	3.661	0.152	1.360	1.435
		0,25	43.943	1.935	0.123	1.247	1.285
	637	0,03	50.643	9.497	0.425	1.338	1.531
		0,10	48.029	4.177	0.211	1.303	1.387
		0,25	40.602	2.858	0.232	1.198	1.253
	1061	0,03	48.029	6.083	0.308	1.303	1.425
		0,10	45.007	4.104	0.245	1.262	1.343
		0,25	38.926	2.263	0.212	1.173	1.217
Saída	265	0,03	109.359	49.016	0.605	1.967	3.116
		0,10	122.130	69.517	0.741	2.078	3.738
		0,25	176.008	108.397	0.734	2.495	5.232
	637	0,03	95.726	44.141	0.654	1.840	2.851
		0,10	108.434	60.641	0.757	1.958	3.378
		0,25	220.090	146.842	0.766	2.790	6.613
	1061	0,03	91.948	27.687	0.435	1.803	2.433
		0,10	140.185	80.923	0.723	2.227	4.202
		0,25	229.121	167.004	0.831	2.847	7.218

Para uma melhor apreciação dos valores obtidos, o parâmetro em análise é o da delaminação ajustada (F_{da}). Os valores são apresentados nas figuras seguintes proporcionando uma melhor interpretação e leitura. Na figura 7.1 temos o gráfico (a) onde temos os valores obtidos para a entrada do furo consoante a velocidade de corte, e no gráfico (b) temos os valores obtidos para a saída do furo consoante a velocidade de corte,

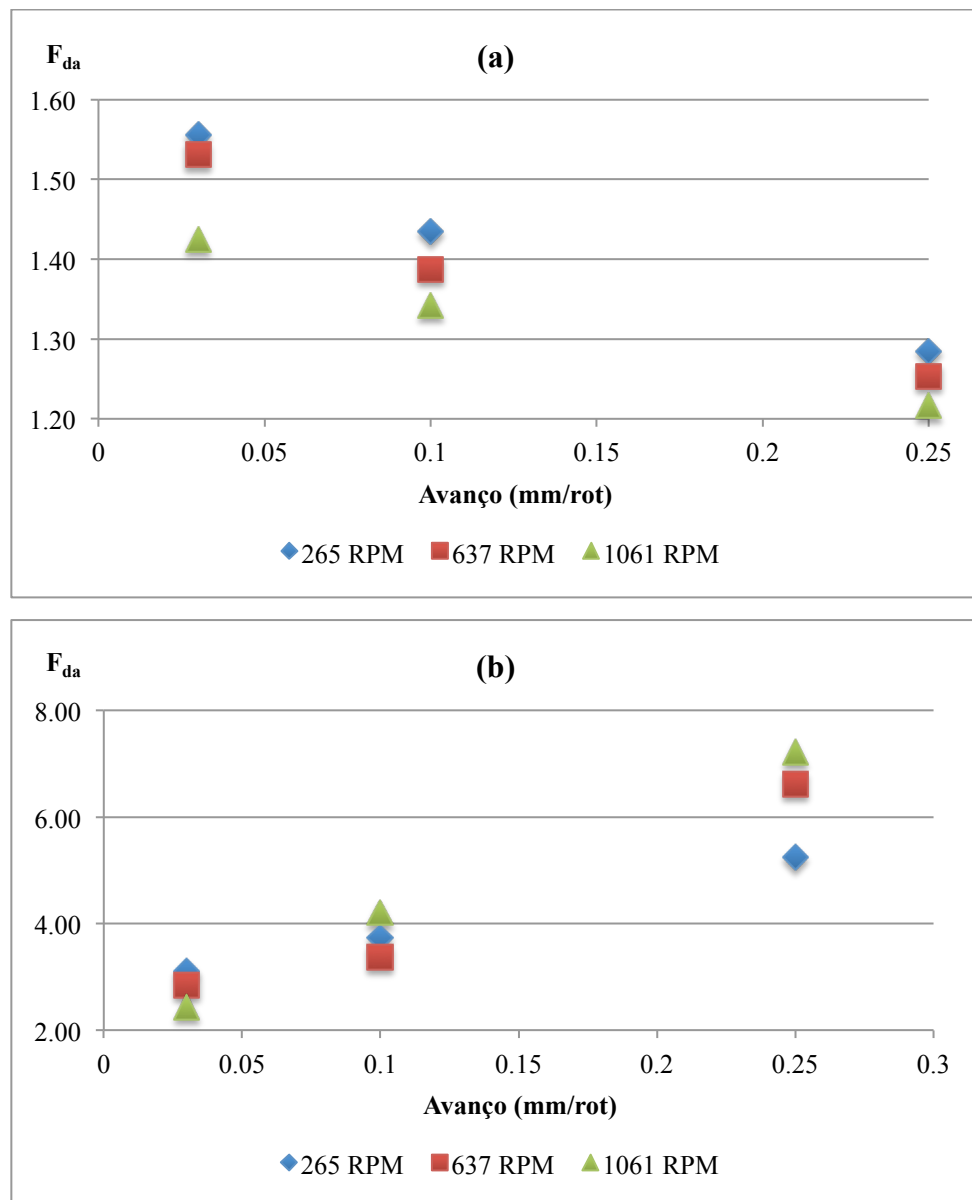


Figura 7-3 – Gráfico F_{da} , entrada do furo (a) com V_c de 265 RPM, 637 RPM e de 1061 RPM, saída do furo (b) com V_c de 265 RPM, de 637 RPM e de 1061 RPM.

Os resultados obtidos para a FC, diferem em alguns pontos dos resultados obtidos pelos diversos autores referenciados no capítulo 2. Para a furação à entrada, os parâmetros usados no presente trabalho estão inseridos nos limites de valores mais usados, e deveria se ter obtido resultados equivalentes, mas como se pode observar no gráfico (a), com o aumento do avanço, não obtivemos o aumento da delaminação à entrada do furo como seria de esperar. Este parâmetro difere dos esperados, e os

parâmetros que podem ter influenciado esta diferença podem estar associados ao facto da ponta da fresa ser diferente das brocas usados nos trabalhos efectuados pelos outros autores, houve também um parâmetro que pode ter influenciado este aumento da delaminação que foi o facto de ao se programar a CNC, devido à irregularidade da espessura da placa, a fresa quando se aproximava da placa de fibra para iniciar a furação dava uma ligeira pancada nesta, e esta pequena pancada pode ter influenciado a delaminação. Não houve possibilidade de se averiguar e efectuar novos testes a uma outra placa devido a não se ter disponível a CNC devido a avaria da mesma.

A espessura da placa relativamente à usada pelos outros autores também difere (Durão, 2006, espessura de 5mm), devido a esta placa ter uma maior espessura, e o facto de ter demorado mais tempo a furar pode ter causado um maior aquecimento da zona de entrada e ter provocado o aumento da delaminação devido ao factor térmico e falta de dissipação do mesmo.

Um parâmetro que podemos verificar que está de acordo com os estudos de Khashaba (2004), é que para placas com maior espessura e com resina epóxi, temos uma diminuição dos valores de delaminação com o aumento da velocidade de corte.

Da observação dos resultados para a delaminação à saída do furo, podemos concluir que estes estão de acordo com os diversos trabalhos já efectuados, para o aumento do avanço, temos o aumento dos valores de delaminação. Outro valor que se pode verificar estar de acordo com a pesquisa apresentada por DeFu Liu et al. (2012), é que para um avanço baixo e para uma velocidade superior temos uma delaminação mais pequena.

7.2. Furação Orbital

A furação orbital é uma furação que não é tão usada como a furação convencional, devido também aos custos associados para a sua realização. É uma operação que demora mais tempo que o outro tipo de furação, implica verificar o tipo de aproximação da fresa, e utilizar uma fresa específica para o trabalho e as condições que se pretende aplicar. Nas figuras 7.4 e 7.5 podemos ver as imagens da furação à entrada e saída após o tratamento de imagem para a obter os valores de delaminação. No quadro 7.2, podemos observar os valores obtidos para a delaminação em volta do furo através do software Image J 1.46. Para o diâmetro nominal do furo (D) no caso da FO, considerou-se um diâmetro de 15mm.

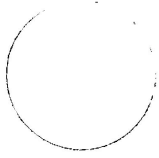
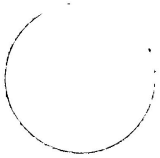
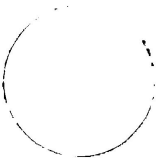
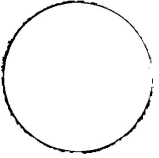
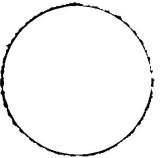
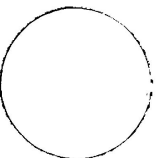
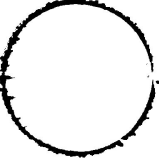
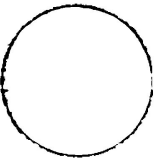
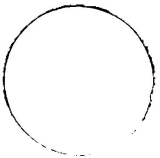
	0,03 mm/rot	0,10 mm/rot	0,25 mm/rot
265 RPM			
637 RPM			
1061 RPM			

Figura 7-4 – Delaminação na superfície de entrada da FO obtida por tratamento de imagem.

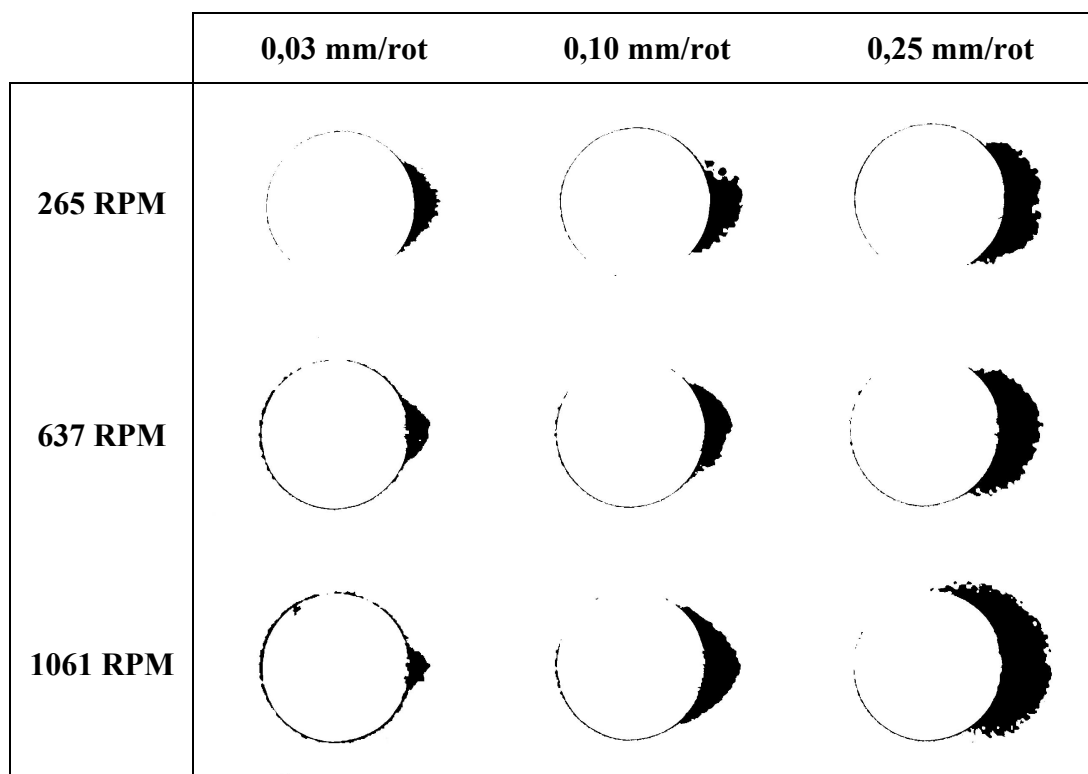


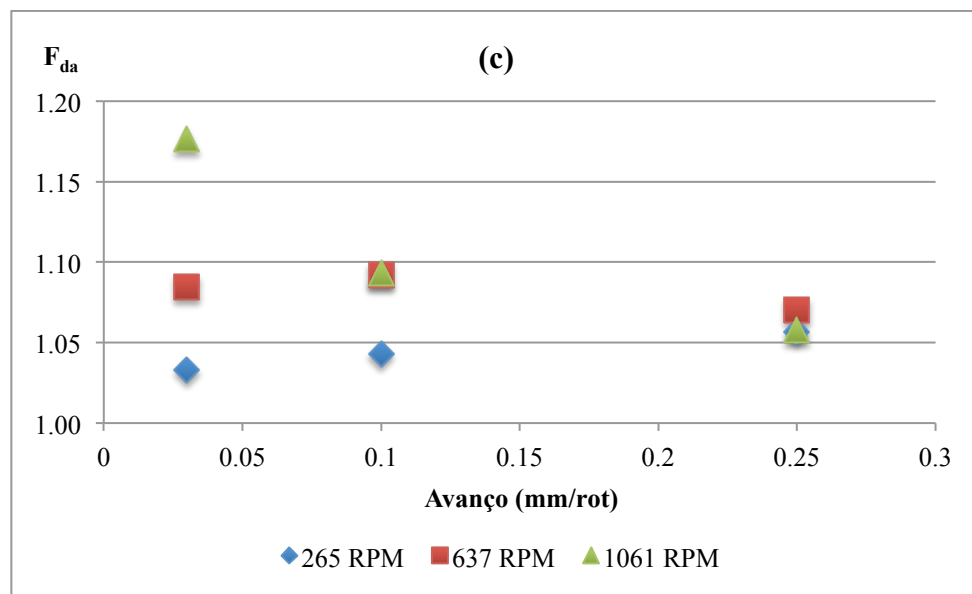
Figura 7-5 – Delaminação na superfície de saída da FO obtida por tratamento de imagem.

Tabela 7-2 – Valores obtidos para furação orbital.

	V_c (RPM)	Avanço (mm/rot)	$A_{máx}$ (mm ²)	A_d (mm ²)	$A_d/(A_{máx}-A_0)$	F_d	F_{da}
Entrada	265	0,03	186.023	2.372	0.255	1.026	1.033
		0,10	189.179	2.926	0.235	1.035	1.043
		0,25	194.333	2.840	0.161	1.049	1.057
	637	0,03	197.559	9.358	0.114	1.057	1.085
		0,10	199.557	9.932	0.128	1.063	1.092
		0,25	195.323	6.539	0.153	1.051	1.070
	1061	0,03	215.903	24.010	0.613	1.105	1.177
		0,10	197.559	12.403	0.595	1.057	1.093
		0,25	191.134	6.157	0.427	1.040	1.058

	V_c (RPM)	Avanço (mm/rot)	$A_{máx}$ (mm ²)	A_d (mm ²)	$A_d/(A_{máx}-A_0)$	F_d	F_{da}
Saída	265	0,03	247.728	15.620	0.220	1.184	1.232
		0,10	273.179	24.220	0.251	1.243	1.319
		0,25	294.679	43.130	0.366	1.291	1.429
	637	0,03	243.009	16.365	0.247	1.173	1.223
		0,10	259.584	21.358	0.258	1.212	1.278
		0,25	308.841	48.833	0.370	1.322	1.479
	1061	0,03	241.905	16.984	0.261	1.170	1.222
		0,10	284.425	32.651	0.303	1.269	1.372
		0,25	324.931	75.268	0.508	1.356	1.601

Para uma melhor apreciação dos valores obtidos, o parâmetro em análise é o da delaminação ajustada (F_{da}). Os valores são apresentados nas figuras seguintes proporcionando uma melhor interpretação e leitura. Na figura 7.2 temos o gráfico (c) onde temos os valores obtidos para a entrada do furo consoante a velocidade de corte, e no gráfico (d) temos os valores obtidos para a saída do furo consoante a velocidade de corte.



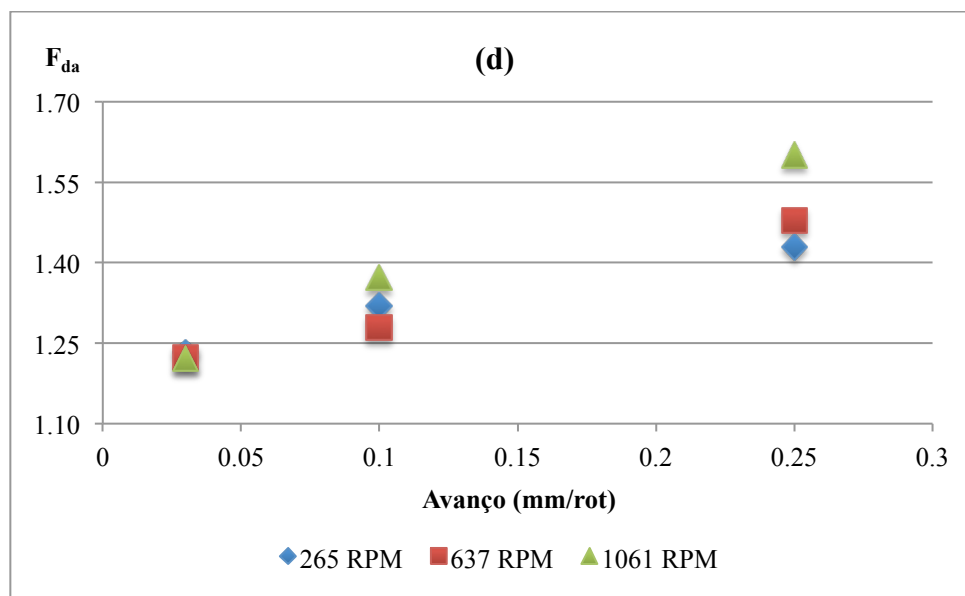


Figura 7-6 – Gráfico F_{da} , entrada do furo (c) com V_c de 265 RPM, 637 RPM e de 1061 RPM, saída do furo (d) com V_c de 265 RPM, de 637 RPM e de 1061 RPM.

Na FO, e pela observação do gráfico (c), temos a mesma situação que aconteceu na FC para o caso da V_c igual a 1061 RPM, ou seja, para o aumento do avanço temos uma diminuição da delaminação, que é o contrário do referido pelos autores citados anteriormente, neste caso pressupõe-se que os parâmetros referidos para a FC que podem ter influenciado de alguma maneira os valores de delaminação são os mesmos.

Para a velocidade de 265 RPM podemos verificar que para o aumento do avanço temos o aumento da delaminação, o que está de acordo com o referido pelos diversos autores. E para a V_c intermédia de 637 RPM, podemos verificar um comportamento irregular, porque inicialmente com o aumento do avanço, a delaminação aumenta, mas depois para o avanço maior, voltamos a ter uma diminuição da delaminação.

Nota-se no entanto que para o caso da V_c mais elevada, tem-se uma maior delaminação do que para uma V_c mais baixa, ao contrário do que acontecia na FC, neste caso ao contrário do que foi referido na pesquisa de DeFu Liu et al. (2012), para uma V_c elevada e um avanço baixo, não temos uma menor delaminação.

Na saída do furo, gráfico (d), temos uma situação de acordo com o esperado e como podemos observar pela comparação dos gráficos (b) e (d), existe uma uniformidade entre eles, ambos têm uma inclinação das rectas muito similar, sendo a única diferença no valor da delaminação resultante, em que a FO, tem valores mais baixos que a FC.

7.3. Furação convencional vs. Furação orbital

A furação convencional como já referido no início do capítulo, só pela observação dos furos realizados pode-se concluir que a FO é melhor em termos de área delaminada em torno do furo e também de uma maior qualidade final.

Na tabela 7.3 e 7.4, temos a comparação dos valores obtidos para as delaminações nos dois casos de furação, sendo que só se vai comparar os valores obtidos para a F_{da} , dado que como explicado anteriormente no trabalho, este valor é o que se aproxima mais quando temos delaminações que não são uniformes em torno do furo. E como a delaminação em torno dos furos da FO, não é uniforme, decidiu-se usar o parâmetro F_{da} para uma melhor aproximação dos valores de delaminação obtidos.

Tabela 7-3 – Valores F_{da} na entrada para furação convencional (FC) vs. furação orbital (FO).

	V_c (RPM)	Avanço (mm/rot)	F_{da}		Diferença (%)
			FC	FO	
Entrada	265	0,03	1,556	1,033	33.61
		0,10	1,435	1,043	27.32
		0,25	1,285	1,057	17.74
	637	0,03	1,531	1,085	29.13
		0,10	1,387	1,092	21.27
		0,25	1,253	1,070	14.60
	1061	0,03	1,425	1,177	17.40
		0,10	1,343	1,093	18.62
		0,25	1,217	1,058	13.06

Nota: Diferença (%) = $[(FC - FO)/FC] \times 100$

Tabela 7-4 – Valores F_{da} na saída para furação convencional (FC) vs. furação orbital (FO).

	V_c (RPM)	Avanço (mm/rot)	F_{da}		Diferença (%)
			FC	FO	
Saída	265	0,03	3,116	1,232	60.46
		0,10	3,738	1,319	64.71
		0,25	5,232	1,429	72.69
	637	0,03	2,851	1,223	57.10
		0,10	3,378	1,278	62.17
		0,25	6,613	1,479	77.63
	1061	0,03	2,433	1,222	49.77
		0,10	4,202	1,372	67.35
		0,25	7,218	1,601	77.82

Nota: Diferença (%) = $[(FC - FO)/FC] \times 100$

Da apreciação das duas tabelas anteriores podemos observar que no caso da entrada as diferenças de delaminação da FC para a FO, tem uma diferença média aproximada de 20%. No caso da saída, já temos uma diferença entre métodos mais acentuada, atingindo uma média aproximada de 60%. Neste caso devido à elevada delaminação no método FC. Esta elevada diferença pode ser devido ao aumento de temperatura na ponta da fresa que no caso da FC não tem grande dissipação de calor. Já no caso da FO, como referido anteriormente no ponto 2.1.2, devido ao movimento orbital é criado um fluxo de ar entre a fresa e o compósito, que permite uma dissipação de calor, e que influencia o arrefecimento da ponta da fresa e consequentemente proporciona uma menor delaminação.

Para uma melhor apreciação dos valores obtidos, o parâmetro em análise é o da delaminação ajustada (F_{da}). Os valores são apresentados nas figuras seguintes proporcionando uma melhor interpretação e leitura. Na figura 7.3 temos os gráficos (e), (f) e (g) onde temos os valores obtidos para a entrada do furo, nos gráficos (h), (i) e (j) temos os valores obtidos para a saída do furo, todos os gráficos é considerado o valor da velocidade de corte fixa e só varia o valor do avanço.

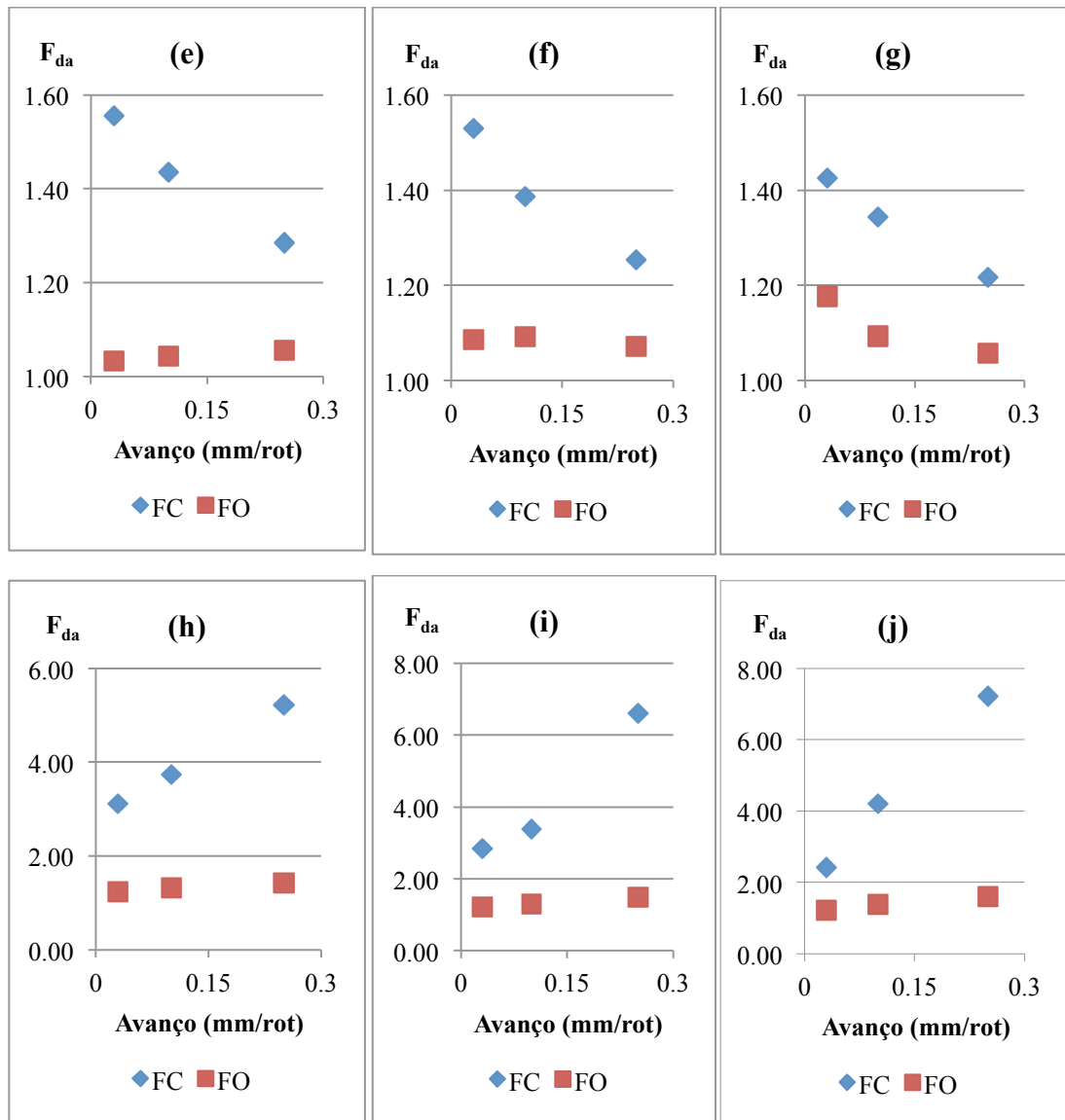


Figura 7-7 – Gráficos F_{da} , entrada do furo (e) com V_c de 265 RPM, (f) com V_c de 637 RPM, (g) com V_c de 1061 RPM, saída do furo (h) com V_c de 265 RPM, (i) com V_c de 637 RPM, (j) com V_c de 1061 RPM.

A comparação entre estes dois métodos de furação, é efectuada com o uso do parâmetro F_{da} , para melhor aproximação do valor da delaminação, pela observação inicial dos gráficos (e), (f) e (g), podemos concluir que a furação orbital, tem um valor para a delaminação criada inferior ao da furação convencional, ou seja, para os parâmetros de entrada do furo, a FO tem uma menor delaminação, e consequentemente tem-se uma melhor qualidade do furo.

Podemos observar ainda que para a FC, na variação do avanço o aumento deste implica a diminuição da delaminação para as três velocidades de corte, já visto no ponto 7.1, e comparando com a FO esta tem uma maior variação do valor da delaminação quando se aumenta o avanço, não sendo uma variação tão uniforme como na FO, existindo aqui alguns factores que poderão ser objecto de um trabalho futuro.

Os parâmetros de saída aplicados nas duas furações, consoante podemos ver nos gráficos (h), (i) e (j), têm o mesmo comportamento para a FC e para a FO. Sendo que esta última apresenta uma delaminação à saída com menor área de dano, logo temos uma furação mais perfeita e com menos probabilidade de existir um ponto de rotura no compósito. Como referido anteriormente, e através da observação da figura 6.7, vemos qual o ponto crítico onde existe maior rotura das fibras e consequentemente a zona de dano maior.

No caso da saída também temos como referido para a entrada, no caso da FC, uma variação dos valores da delaminação muito acentuada, enquanto que na FO se mantém uma variação mais uniforme. Para os dois casos podemos observar que a sensibilidade ao avanço para a FO não é tão afectada como no caso da FC.

A FO comparativamente com a FC, provoca menos dano à saída do furo, deixando para este caso prático a necessidade de se averiguar o porquê do dano se concentrar todo num só lado do furo na FO, num trabalho futuro.

8. CONCLUSÕES

A delaminação nos materiais compósitos após a sua furação, influencia a capacidade de resistência estrutural, reduzindo-a a longo ou curto prazo consoante a severidade do dano das fibras no compósito, deteriorando o mesmo. Devido a este fenómeno existem diversos factores que devem ser tidos em conta quando se necessita de efectuar furos nos compósitos para posteriormente realizar as necessárias ligações mecânicas, com outros materiais.

1. Os parâmetros a aplicar na operação de furação devem ser bem estudados e escolhidos (velocidade de corte, avanço, geometria da fresa ou da broca).
2. Apesar de se terem aplicado parâmetros de furação equivalentes aos usados na literatura existente os resultados para a delaminação à entrada do furo foram diferentes do esperado. Com o aumento do avanço seria de esperar que ocorresse o aumento da delaminação, o que não foi o caso. Na FC e na FO, ambas tiveram um decréscimo de delaminação quando se aumentou o avanço.
3. Foi comprovado para a FC que a uma correspondente velocidade de corte superior e um avanço pequeno, o valor de delaminação é menor que para um avanço e velocidade maior.
4. Também ficou comprovado que para placas com maior espessura, temos uma diminuição dos valores de delaminação quando aumenta a velocidade de corte.
5. O resultado obtido para a delaminagem na saída dos furos realizados está de acordo com a literatura existente.

6. O factor de delaminação ajustado permitiu uma melhor comparação de valores devido a contar com a área afectada e não só com o diâmetro máximo de influência da delaminação.

7. A FO comparativamente com a FC permite melhor qualidade no furo realizado, pois cria menor delaminação em torno do furo. Tem só o aspecto negativo de ser uma furação que leva mais tempo que a FC, dando uma menor rentabilidade para produção em série.

9. TRABALHOS FUTUROS

1. Realização de mais ensaios com os mesmos parâmetros para se fazer a média dos resultados, dado que só foi possível fazer uma experiência por causa da CNC ter avariado.
2. Usar a termografia para ajudar a avaliar os danos obtidos e ver se a temperatura gerada teve influência na delaminação existente na periferia do furo.
3. Usar máquina com controlo de força axial, para avaliação da influência desta.
4. Usar outro tipo de geometria na fresa, dado este ser um parâmetro importante na obtenção de furos em laminados, de qualidade aceitável. Usar depois um método de obtenção de imagens por radiografia ou ultra-sons, que permitirá detectar as diferenças entre os furos realizados pelas diferentes fresas.
5. A variação dos parâmetros de corte, nomeadamente o avanço deverá ser melhor avaliado, dado ser o factor mais influente na furação convencional.
6. Variar o modo como se efectua a furação orbital, dado que a CNC usada permitia vários tipos de aproximação, de aprofundamento e de rotação da ferramenta, e avaliar qual será o melhor método a usar em furação orbital.
7. Testar métodos para obtenção de furos sem delaminação, variando o avanço da ferramenta durante o furo, obter valores de referência dos estudos já efectuados por diversos autores.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Capello E, "Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates", J. Mater. Process Technol., 148:186-95, 2004

Capello E, Tagliaferri V., "Drilling damage of GFRP and residual mechanical behavior" – Part II: Static and cyclic bearings loads, J. Compos. Technol., 23(2):131-7, 2001

Chaves e Sousa, Paulo Caldeira, "Materiais compósitos: O que são compósitos", Apontamentos da disciplina Materiais Compósitos, ISEL, 2012

Chen, W.C., "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates", Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.37, N.º8, pp. 1097-1108, 1997

Davim, J.P., Rubio, J.C., Abrão, A.M., "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates", Composites Science and Technology 67, pp. 1939-1945, 2007

DeFu Liu, YongJun Tang, W.L. Cong, "A review of mechanical drilling for composite laminates", Composite Structures 94, pp. 1265-1279, 2012

Durão, L., Gonçalves, D., Albuquerque, V., Tavares, J., "Avaliação de ferramentas para a furação de laminados, 2010

Durão, L., Marques, A., Magalhães, A., Baptista, A., "Maquinagem de compósitos de matriz polimérica", Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecânica, Vol. 10, N.º 2, pp. 59-67, 2006

Durão, L., Tavares, J., Marques, A., Magalhães, A., Figueiredo, M., "Estudo da furação de laminados carbono/epóxido com diferentes brocas", 2004

Durão, L., Tavares, J., Marques, A., Magalhães, A., Freitas, M., “Estudo da influência da pré-furação no dano em laminados carbono/epóxico”, *Mecânica Experimental*, Vol 15, pp. 73-81, 2008

Gonçalves, D., Durão, L., Albuquerque, V., Tavares, J., Baptista, A., “Avaliação de ferramentas na furação de laminados compósitos”, *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Vol. 23, n.º 1/2, 2011

Hocheng H, Dharan CKH, “ Delamination during drilling in composite laminates”, *J. Eng. Ind., ASME*, 112:236-9, 1990

Hocheng H, Tsao CC., "The path towards delamination-free drilling of composite materials", *J. Mater. Process Technol.*, 167:251-64, 2005

J.C. Campos Rubio, Alexandre M. Durão, Paulo E. Faria, J. Paulo Davim, “Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados”, *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Vol. 19, n.º 1/2, 2007

J.C. Campos Rubio, Leonardo R. Silva, Alexandre M. Durão, Paulo E. Faria, A. Esteves Correia, J. Paulo Davim, “Furação com alta velocidade de corte em compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro”, *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Vol. 19, n.º 3/4, 2007

Jain S, Yang DCH, “Delamination-free drilling of composite laminates”, *J. Eng. Ind, ASME*, 116:475-81, 1994

Jones, Robert M., "Mechanics of composite materials", 2nd Ed, 1999

Khashaba, “Delamination in drilling GFR-thermoset composites”, *Composite Structures* 63, pp. 313-327, 2004

Khashaba, M.A. Seif, M.A. Elhamid, “Drilling analysis of chopped composites”, *Composites: Part A* 38, pp. 61-70, 2007

Khashaba, El-Sobaty IA, Megahed AA, "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites": Part I - effect of machining parameters. *Composites: Part A*, 41:391-400, 2010

Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., Surcin L., "Drilling of composite structures", *Composite structures*, 52, 511-516, 2001

Metha, M., Reinhart, T., Soni, A., "Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates", *Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week*, pp. 113-126, 1992

Nobe H, Aoyama E, Inoue H, Hirogaki T, Kitahara Y, Katayama T, et al., "Study on cause of internal damage of drilled GFRP". *Key Eng. Mater.*, 137:123-30, 1998

Piquet R., Ferret B., Lachaud F., Swider P., "Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills". *Composites: Part A*, 31:1107-15, 2000

Sadek A, et al., "Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012

Sanjay K. Mazumdar, "Composite manufacturing, materials, product and process engineering", CRC Press LLC, 2002

SP Systems, "Guide to composites", www.spsystems.com

Stone R, Krishnamurthy K., "A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of grafite-epoxy laminates", *J. Mach. Tools Manufact.*, 36(9):985, 1996

Tsao, C.C., Hocheng , H., "The effect of chisel lenght and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials", *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 43:1087-92, 2003

Tsao, C.C., Hocheng , H., “Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material”, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 44, 1085-1090, 2004

Tsao, C.C., Hocheng , H., “Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill”, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1261-70, 2005

Tsao, C.C., “The effect of pilot hole on delamination when core drill drilling composite materials”, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 46:1653-61, 2006

Tsao, C.C., Hocheng H., "Parametric study on thrust force of core drill", *J. Mater. Process Technol.*, 192-193:37-40, 2007

Tsao, C.C., "Experimental study of drilling composite materials with step-core drill". *Mater. Des.*, 29:1740-4, 2008

Tsao, C.C., "Prediction of thrust force of step drill in drilling composite materials by Taguchi method and radial basis function network". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 36:11-8, 2008

Upadhyay PC, Lyons JS, "On the evaluation of critical thrust for delamination-free drilling of composite laminates". *J. Reinf. Plast. Compos.*, 18:1287-303, 1999

Zackrisson, Persson, Eriksson, “Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates”, *Composites Part A* 28^A, pp. 141-151, 1997